

Alain G.

# **Journées de Rochebrune**

20-24 janvier 1992

**Apprentissage, évolution, adaptation**

avec le patronnage de l'AFCEP et de l'ARC

# **Modèles biomimétiques**

# APPLICATION D'UN ALGORITHME D'APPRENTISSAGE PAR PENALITE / RECOMPENSE A LA GENERATION DE FORMES LOCOMOTRICES HEXAPODES

Claude TOUZET et Olivier SARZEAUD

L.E.R.I., Parc Georges Besse

F - 30 000 NIMES

Tél. : +(33) 66 38 70 29, Email : touzet@eerie.eerie.fr

## Introduction

La coordination de mouvement est d'un intérêt majeur que ce soit dans le domaine de la robotique ou celui de la neuro-éthologie. Habituellement, les modèles biologiques font appel à des descriptions très détaillées tant aux niveaux cinématique, dynamique qu'électrophysiologique et histologique. L'un des apports des réseaux de neurones artificiels est de proposer de remplacer une partie de ces modélisations par leur faculté d'adaptation et d'apprentissage [Ritter 91]. Ainsi, les simulations réalisées avec l'algorithme par pénalité/récompense montrent que cet algorithme permet d'éviter l'hypothèse d'un générateur central de formes locomotrices hexapodes chez la blatte américaine.

## Algorithme d'apprentissage par pénalité/récompense (ARP)

Il a été originellement proposé par Barto et Anandan [Barto 85]. Il s'applique à toute architecture de réseau, la seule contrainte étant d'avoir des neurones de sortie stochastiques, gouvernés par la règle habituelle :

$$\text{Prob}(S_i = \pm 1) = g(h_i) = \frac{1}{1 + \exp(\pm 2\beta h_i)} \quad \text{où } h_i = \sum_j w_{ij} V_j$$

La valeur  $S_i$  (binaire) des neurones de sortie est tirée au sort avec une probabilité que le neurone se trouve dans l'état +1 fonction de la somme pondérée des entrées  $h_i$ . Cette fonction  $g$  est une sigmoïde dont les valeurs asymptotiques sont 0 et +1.  $\beta$  est un paramètre qui détermine la valeur de la pente de la courbe.

Le principe de l'algorithme est alors le suivant :

- Dans une première étape, les poids sont initialisés à de petites valeurs aléatoires qui placent les probabilités des neurones de sortie autour de 0.5.
- Puis, tant que la sortie du réseau n'a pas produit une séquence satisfaisante suffisamment longue :

- une entrée  $\xi$  est présentée,
- une sortie correspondante possible  $S_i$  est calculée pour chaque neurone,
- la sortie globale produite est analysée de façon à générer un signal de retour  $r$  positif ou négatif, et une sortie cible (désirée) est choisie :

$$\zeta_i = \begin{cases} S_i & \text{si } r = +1 \text{ (récompense)} \\ -S_i & \text{si } r = -1 \text{ (pénalité)} \end{cases}$$

- les poids sont modifiés par une méthode de gradient en prenant pour sortie effective la moyenne  $\langle S_i \rangle$  des sorties que l'on aurait obtenues si l'on avait effectué un très grand nombre de présentation de la même entrée. (Rappelons que le comportement stochastique des neurones de sortie autorise l'obtention de sorties différentes pour une même entrée et avec la même configuration de poids.) La moyenne est donnée par la formule :

$$\langle S_i \rangle = (+1)g(h_i) + (-1)[1 - g(h_i)] = \tanh(\beta h_i)$$

L'erreur considérée est alors :

$$\delta_i = \zeta_i - \langle S_i \rangle$$

La modification des poids est réalisée par la classique méthode du gradient :

$$\Delta w_{ij} = \eta(r)\delta_i V_j$$

En général,  $\eta$  dépend de  $r$  et est pris 10 à 100 fois plus grand ( $\eta^+$ ) pour  $r=+1$  que pour  $r=-1$  ( $\eta^-$ ). La règle globale est donc finalement :

$$\Delta w_{ij} = \begin{cases} \eta^+ [S_i - \langle S_i \rangle] V_j & \text{si } r = +1 \text{ (récompense)} \\ \eta^- [-S_i - \langle S_i \rangle] V_j & \text{si } r = -1 \text{ (pénalité)} \end{cases}$$

La figure 1 résume le fonctionnement de l'algorithme.

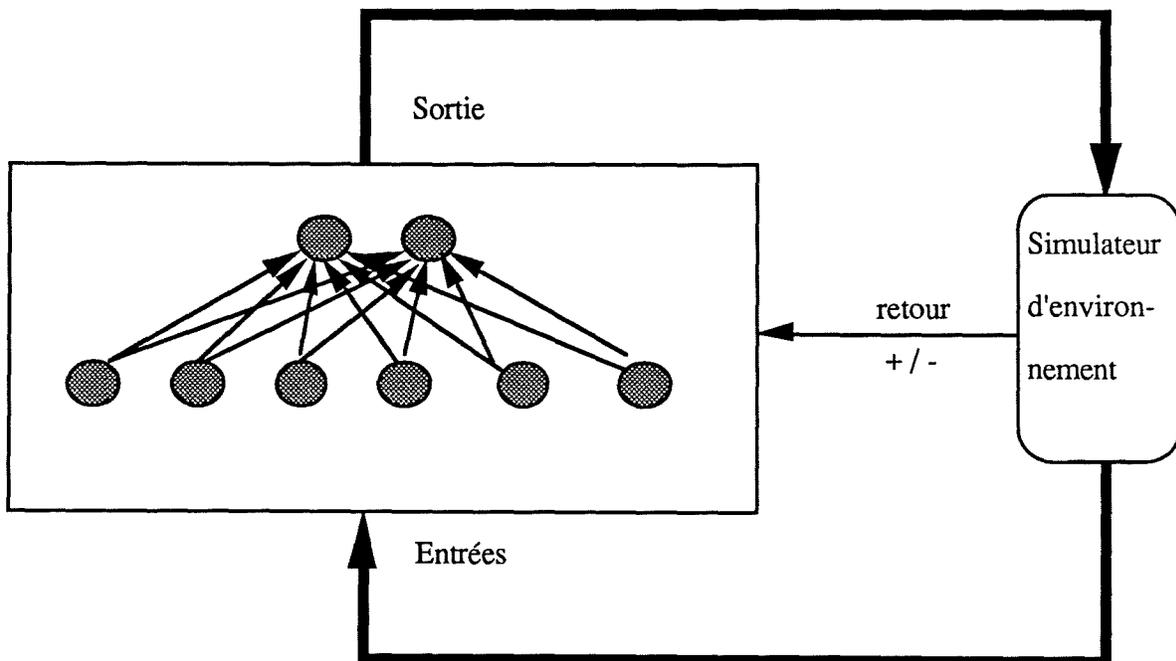


Figure 1. Algorithme d'apprentissage par pénalité/récompense (d'après [Hertz 91])

## Application à la marche hexapode

Avec l'objectif de réaliser l'apprentissage sur une structure composée de plusieurs réseaux de neurones interconnectés, l'algorithme ARP est utilisé de la manière suivante. Durant l'apprentissage, une entrée est présentée au système multi-réseaux. Chacun des réseaux génère sa réponse par rapport aux entrées reçues. Cette réponse tient compte de la nature stochastique des neurones de sortie. On introduit ici une part d'aléatoire dans le comportement du système. Si la réponse fournie par le système global est considérée comme bonne, l'algorithme tend à favoriser l'apparition de ce comportement en faisant évoluer sa nature aléatoire vers quelque chose de plus déterministe. Dans le cas où la réponse du système globale est considérée comme mauvaise, on cherche à éviter l'apparition du comportement montré. Ce processus est itéré jusqu'à l'obtention du comportement désiré pour l'ensemble du système.

En résumé, il s'agit d'une exploration a priori aléatoire de l'espace de sortie. Cependant, chaque avancée dans la "bonne" direction est conservée, et on s'éloigne des états pénalisants.

## Simulations

Chez la plupart des insectes, six pattes permettent la locomotion. La marche hexapode est un problème de coordination complexe en temps réel dans un environnement variable. Néanmoins, l'insecte peut avancer à différentes vitesses, résister à un certain nombre de perturbations telles que l'amputation d'une patte, la collision avec un mur ou le déplacement sur une surface non plane. On ne connaît pas complètement les circuits neuronaux impliqués dans la locomotion chez les insectes. Cependant les travaux entrepris ont montré que chaque patte est doté de son propre générateur de mouvement et que celui-ci est relié par des connexions intra et intersegments inhibitrices [Wilson 66]. L'hypothèse de Pearson [Pearson 76] postule l'existence d'un générateur central de formes locomotrices. Beer [Beer 90] avec sa *Periplaneta* computatrix (modélisation informatique de blatte) complète cette hypothèse avec un schéma d'interconnexions restrictif au niveau des formes locomotrices possibles. Par exemple, deux pattes du même côté ne peuvent se lever en même temps, etc.

Notre objectif est de vérifier que la présence d'un générateur central de formes locomotrices n'est pas nécessaire, son rôle peut être tenu par l'algorithme d'apprentissage. Nous avons simplifié l'expérimentation en ne considérant que la position des pattes et non pas la dynamique d'activation de celles-ci. Le système se compose des six circuits neuronaux des six pattes, mais sans superviseur. La structure du système est montrée figure 2.

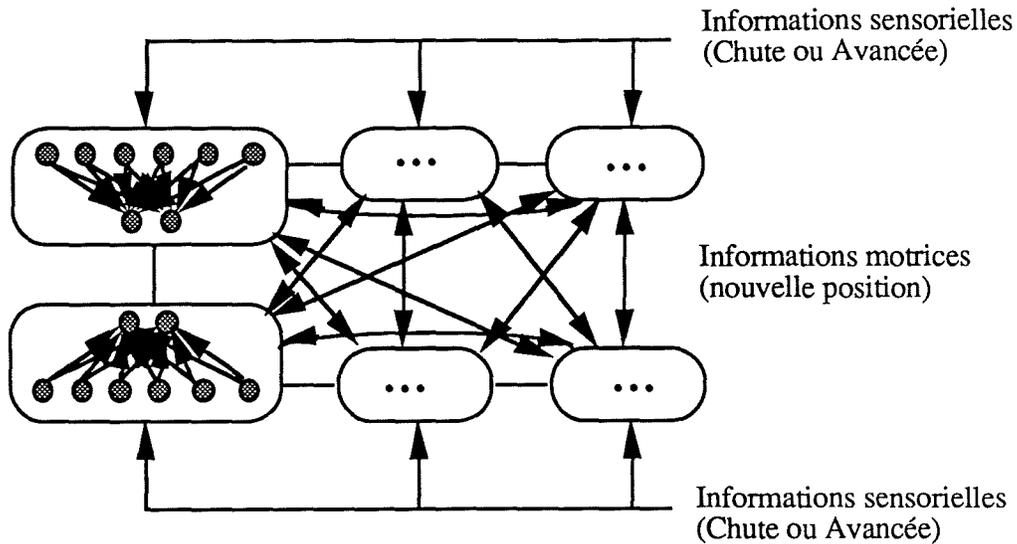


Figure 2. Le système de locomotion est composé de six réseaux neuronaux complètement interconnectés, sans générateur central de formes locomotrices. Chaque réseau comporte 6 neurones d'entrée, 2 neurones de sortie (12 connexions pondérées).

Les entrées du système sont les informations sensorielles relatives à la position des pattes. Sur la base de cette entrée, le système génère une sortie qui est la nouvelle position des pattes. Ainsi, chaque patte a la possibilité de rester inactive, d'avancer ou de reculer. Seule l'action de recul est motrice. L'effet sur l'environnement peut être de trois types : aucun déplacement, avancée ou chute. A partir de cette information, l'apprentissage permet d'éduquer chacun des réseaux pour la génération de formes locomotrices. Au fur et à mesure qu'une marche est découverte par le système, elle lui est interdite, ceci dans le but de découvrir d'autres formes locomotrices. A l'issue de l'apprentissage, toutes les formes possibles ont été découvertes. La figure 3 montre une forme de locomotion hexapode.

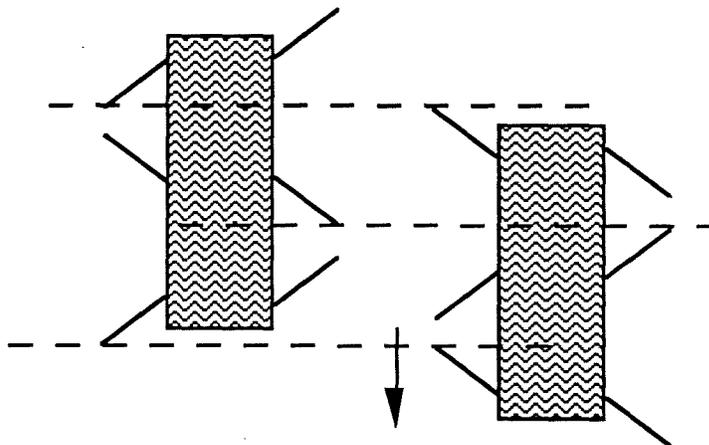


Figure 3. Une forme locomotrice hexapode en deux temps.

## Conclusion

Ce premier travail a permis de montrer que les recherches menées dans le domaine des réseaux de neurones artificiels peuvent remplacer une partie du détail des modélisations biologiques par leur propriété d'apprentissage et de généralisation. Ainsi, un algorithme d'apprentissage sur une structure neuronale ad-hoc permet d'éviter l'hypothèse d'un générateur central de formes locomotrices hexapodes dans le cas de la blatte américaine. L'algorithme présenté ici fonctionne par pénalité/récompense selon le comportement réalisé précédemment par le système. Le comportement stochastique du système durant la phase d'apprentissage lui permet d'explorer l'espace des comportements possibles.

Nous sommes conscients que les restrictions que nous nous sommes imposés, en particulier en ne considérant que la position statique des pattes, limitent la portée de nos résultats. Nos prochaines expérimentations tendront à prendre en compte l'aspect dynamique de la génération de formes locomotrices.

Enfin, il faut mentionner que le fait de se cantonner à des simulations nous coupent d'un grand nombre de problèmes réels. De fait, il est prévu de réaliser un robot mobile doté de six pattes, des capteurs, des effecteurs et de l'algorithme précédemment cités, afin de valider nos résultats face au monde réel.

## Bibliographie

- [Barto 85] A. G. Barto & P. Anandan, "Pattern Recognizing Stochastic Learning Automata," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-15 : 360-375, 1985.
- [Beer 90] R. D. Beer, "Intelligence as Adaptive Behavior, An Experiment in Computational Neuroethology," Perspectives in Artificial Intelligence, Vol. 6, Academic Press, Inc., 1990.
- [Brooks 89] R. A. Brooks, "A robot that walks: Emergent behaviors from a carefully evolved network," Neural Computation 1(2) : 253-262, 1989.
- [Hertz 91] J. Hertz, A. Krogh & R. G. Palmer, "Introduction to the Theory of Neural Computation," A Lectures Notes Volume in the Santa-Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City, 1991.
- [Pearson 76] K. G. Pearson, "The control of walking," Scientific American, 235 : 72-86, 1976.
- [Ritter 91] H. Ritter and H. Cruse, "Neural Network Approaches for Sensory-Motor-Coordination," GI Kongress Wissenbasierte Systeme, W. Brauer and D. Hernandez Eds., Informatik Fachberichte 291, Proceeding Springer Verlag, pp. 498-507, Munich, RFA, October 1991.
- [Wilson 66] D. M. Wilson, "Insect Walking," Annual Review of Entomology 11 : 103-122, 1966.

## ACTIVITE SPONTANEE DANS LES RESEAUX NEURONAUX

E.Durand, C.Lorenzi, N.Tirandaz  
L.E.A.C.M. - Institut de psychologie  
5, avenue Pierre Mendès-France - C.P. 11 Bron Cedex

### MOTS-CLES:

Neurone, réseau, activité spontanée, modèle, auto-organisation.

Beaucoup de fibres nerveuses présentent une activité spontanée, c'est à dire une activité en l'absence de stimulation, une activité propre. Son origine est encore controversée: la première hypothèse met en avant une sécrétion spontanée de médiateur dans l'espace synaptique, source de potentiels miniatures qui s'additionnent spatio-temporellement pour engendrer de temps à autres un spike. La seconde hypothèse est basée sur l'existence d'un bruit dont la membrane neuronale serait le siège. L'observation électrophysiologique met en évidence pour ces fibres un taux de décharge (nombre de potentiels d'action par seconde) relativement stable, bien que le rythme soit irrégulier. Dans le nerf cochléaire (1), par exemple, ce taux de décharge varie suivant les fibres de 0 à 120 Hz, ce qui permet de décrire trois classes de neurones de faible, moyenne et forte activité spontanée. Cette dernière se laisse généralement représenter par une distribution gaussienne ou poissonnienne. Cette activité spontanée est en un certain sens génératrice de bruit dans les réseaux neuronaux réels. Nous désirons étudier par simulation ses potentialités auto-organisatrices, et ce préalablement à toute expérience sensorielle. Nous faisons l'hypothèse de l'émergence d'une cartographie fonctionnelle primitive au sein des réseaux neuronaux indifférenciés, grâce au bruit propre généré par chaque cellule nerveuse. X

Nous présentons ici les résultats de nos premiers travaux. Ceux-ci concernent principalement la mise en place d'un modèle et une première estimation des résultats qu'il permet d'obtenir.

### DESCRIPTION DU MODELE:

Le réseau neuromimétique que nous avons conçu est une représentation simplifiée de couche corticale indifférenciée. Les tissus corticaux sont probablement très semblables d'une zone à l'autre du cortex (2). Il s'agit d'un modèle informatique développé en langage turbo C sous AT 386.

Le réseau est défini par un ensemble de neurones auxquels on attribue arbitrairement un site (i,j) sur une matrice carrée (10\*10).

Chaque neurone possède plusieurs entrées provenant des fibres issues des autres neurones du réseau. L'activité de chaque neurone est temporelle, décrite par un train de spikes. Ces

derniers sont engendrés en réponse aux spikes pré-synaptiques émis en entrée du neurone ainsi qu'à des phénomènes spontanés. Chaque neurone possède une sortie qui se ramifie vers d'autres neurones afin de propager l'influx nerveux. Chaque liaison interneuronale est modélisée par une pondération synaptique qui atténue plus ou moins l'efficacité de l'arrivée d'un spike sur cette liaison. Conformément à la structure d'inhibition latérale non-récurrente la plus générale (3), il possède 8 connections excitatrices latérales en direction de ses proches voisins. Il possède aussi 12 connections inhibitrices latérales en direction des neurones proches autres que ses plus proches voisins (configuration du "chapeau mexicain"). La grille présentée en figure 1 illustre plus finement cette structure d'inhibition latérale.

* A B A *	-25% de la sortie de N est transmise à A
A C D C A	-100% de la sortie de N est transmise à B
B D N D B	+50% de la sortie de N est transmise à C
A C D C A	+100% de la sortie de N est transmise à D
* A B A *	

Fig.1

Modèle d'inhibition latérale utilisé

On observe les sorties du neurone central N.

Nous avons développé une fonction neurone de façon à respecter au mieux la réalité neurophysiologique (4).

L'unité de temps est de 1/10ème de milliseconde.

Chaque neurone est attaqué simultanément par les potentiels d'action pré-synaptiques et un bruit gaussien. Ce dernier modélise l'activité spontanée du neurone, réglée à environ 70 Hz.

Le signal résultant est injecté dans un modèle de potentiel membranaire, assimilable à un réservoir, que l'on caractérise par son niveau  $N(t)$ . Une fuite dans le réservoir simule une perte de potentiel dans le soma du neurone. L'équation temporelle du niveau est la suivante:

$$N(t) = N(t-1) * \text{Fuite} + \text{Signal} + \text{Bruit}$$

L'équation du niveau modélise un mécanisme à mémoire permettant au neurone de tenir compte de son état antérieur. La fuite est égale à 5% du niveau antérieur. La variable Signal représente l'entrée pré-synaptique globale. Le niveau est ensuite comparé à un modèle de seuil d'excitabilité qui rend parallèlement compte de la période réfractaire relative. L'équation du seuil est:

$$\text{Seuil} = \exp(-t/\delta) + S0$$

avec: S0: valeur minimum du seuil.

$\delta$ : paramètre réglant la valeur de la période réfractaire à 12 ms.

La quantité de dépassement du seuil par le niveau détermine ensuite une certaine probabilité P d'émission d'un spike telle que:

$$P = 2 - \exp(-h/2) + \text{random}-0.5$$

avec: h: niveau - seuil

random: fonction générant aléatoirement des valeurs comprises entre 0 et 1.

Cette probabilité rend compte de la nature stochastique des trains d'impulsions nerveuses émis par le neurone. En cas

d'émission d'un spike, le neurone entre en période réfractaire absolue (de durée 1 ms).

#### PREMIERS RESULTATS ET DISCUSSION:

Nous avons parallèlement étudié le comportement unitaire et global du réseau. Le comportement temporel unitaire est observé à l'aide d'histogrammes des temps post-stimulatoires (P.S.T.H), rendant compte de l'évolution du taux de décharge moyen d'une fibre en fonction du temps. Le moyennage est effectué sur 500 simulations de durée respective 20 ms. Il est aussi observé à l'aide d'histogrammes d'intervalles inter-spikes, permettant de visualiser l'évolution de la fréquence instantanée de décharge.

Ces simulations mettent en évidence une redistribution de l'activité spontanée des neurones constitutifs du réseau, initialement équivalents. Les histogrammes d'intervalles inter-spikes révèlent l'inactivité de certains neurones tout au long d'une simulation. Le taux de décharge moyen des autres neurones se répartit entre 0 et 1 kHz. Cet effet est directement imputable à la structure d'inhibition latérale favorisant certaines fibres au dépend d'autres. Il s'agit, en quelque sorte, d'une réorganisation fonctionnelle du réseau en sous-ensembles de forte, moyenne et faible activité spontanée. Ce comportement peut être assimilé à une différenciation primitive du réseau sous l'action unique du bruit généré par chaque neurone. Ce phénomène auto-organisateur, bien qu'élémentaire relativement à l'émergence de véritables cartes corticales (5), pourrait s'avérer important pour le traitement ultérieur d'informations sensorielles.

Parallèlement, ces premiers résultats permettent de s'interroger sur la différenciation entre activité spontanée et activité "non spontanée". Les simulations effectuées sur notre modèle montrent que l'activité spontanée des neurones fait l'objet d'une modulation. Elle semble déjà synchronisée avant le stimulus. Ce dernier ne représente qu'une perturbation du système qui fonctionne déjà, n'amenant qu'à une redistribution temporelle de l'activité.

#### BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE:

- (1) J.M.ALAN, Electrophysiologie de la cochlée  
Paris, INSERM/SFA, 1988. pp.91-141.
- (2) T.HERVE, Champ aléatoire et information neuronale  
Thèse d'état, INPG Grenoble, 1984.
- (3) S.A.SHAMMA Speech processing in the auditory system:  
lateral inhibition and the central processing  
of speech evoked activity in the auditory  
nerve.  
J.A.S.A. 1985. pp.1622-1632.
- (4) B.DONHOUEDE, Le codage nerveux du message acoustique  
modélisation des premiers étages du système  
auditif périphérique.  
Thèse d'état ICP/INPG Grenoble. 1984.
- (5) T.KOHONEN, Self-organized formation of topologically  
correct feature maps.  
Biol.Cybern. N°43, 1982. pp.59-69.

# ATTRIBUTION DE RECOMPENSES DANS UN SYSTEME DE CLASSIFIEURS

## APPRENTISSAGE VERSUS ROBUSTESSE

Joëlle Biondi & Philippe Collard  
Université de Nice-Sophia Antipolis  
CNRS - I3S  
bat. 4, rue A. Einstein 06560 Valbonne, France  
fax : (33) 92 94 28 98 tel. : (33) 92 94 26 17

### INTRODUCTION

Le cadre général de cet article est celui d'un système adaptatif en particulier un système de classifieurs. Nous considérons que l'adaptation du système à son environnement est obtenue par une succession de transformations structurelles qui permettent au système d'évoluer. Chaque phase du processus d'évolution résulte d'un apprentissage qui permet de discriminer parmi les évolutions possibles celles qui tendent à améliorer le comportement du système dans son environnement. Dans cet article nous nous intéressons uniquement à la phase d'apprentissage. Plus précisément, reprenant les solutions classiques proposées pour résoudre le problème de l'attribution de récompenses, nous proposons une amélioration du processus d'attribution. Notre proposition fournit un critère de terminaison pour la phase d'apprentissage et améliore la convergence, notamment dans un environnement bruité.

### 1. PRESENTATION DE L'ALGORITHME BUCKET BRIGADE

Nous présentons l'algorithme "Bucket Brigade" [HOL 85] qui permet de résoudre le problème de l'attribution de récompenses ou de blâmes [HUA 89]. Cet algorithme gère, pour chaque action utilisée pour constituer une séquence, une valeur scalaire, la force, qui représente l'intérêt relatif de l'action pour le système ; c'est cette valeur qui est utilisée en phase de résolution pour déterminer, en cas de conflit, l'action qui sera déclenchée. L'intérêt de cet algorithme est de résoudre le problème d'attribution de récompense en utilisant uniquement des informations locales indépendantes du domaine [BEL 89].

Nous présentons l'interprétation "classique" de l'algorithme B.B. Cette interprétation utilise une métaphore économique [GOL 89]. L'algorithme B.B. modélise le comportement d'une société économique : les actions sont considérées comme des agents économiques, la force d'une action représente le capital de l'agent. Initialement, tous les agents possèdent le même capital. A chaque étape, les agents candidats, qui correspondent aux actions dont la partie condition "matche" le contexte courant, participent à une vente aux enchères ; l'objet de la vente est le droit de participer à la séquence. Ces agents doivent émettre une offre (Bid) pour concourir. Le (ou les gagnants) sera celui qui aura proposé la meilleure offre ; il aura alors le droit d'agir pour modifier l'état courant du système. Le mécanisme de mise à jour des forces repose uniquement sur le fait que l'agent retenu pour agir doit payer son offre à l'agent qui a gagné l'étape précédente ; ce qui est justifié par le fait que ce dernier est directement responsable de la situation qui a permis à l'agent retenu de concourir. Un agent qui intervient dans une séquence verra donc son capital diminuer de son offre et augmenter de l'offre de son successeur. En particulier, le dernier agent qui intervient dans une séquence est rétribué directement par l'environnement, le salaire correspond à la récompense. Le premier agent de la

séquence, quant à lui, paye directement son offre à l'environnement qui a sollicité le système. Une séquence d'actions peut donc être interprétée comme une chaîne d'intermédiaires entre celui qui paie la récompense et celui qui reçoit l'offre du premier agent.

L'avantage essentiel de cet algorithme est d'implémenter un processus local qui permet la propagation globale des récompenses. Ce processus est temporellement local au sens où il utilise des informations qui ont été mises à jour récemment ; de même, il est spacialement local au sens où il met uniquement en jeu les forces associées à des classifieurs voisins [DOR 91].

## 2. ADAPTABILITE ET ATTRIBUTION DE RECOMPENSES

Nos travaux sur l'apprentissage naturel nous ont conduit à nous intéresser aux apports de la psychologie. Concernant l'apprentissage chez l'animal d'une association de cause à effet, le psychologue R.A. Rescorla conclut «... l'ensemble de ces résultats conforte l'idée que la quantité d'apprentissage d'un animal à l'égard de la relation entre un stimulus neutre et un choc dépend du degré de surprise créé par le choc» [RES 72].

Suivant la même idée, nous établissons que la variation de la quantité d'apprentissage est fonction non seulement de la récompense mais également du «niveau cognitif» du système. Plus précisément, on peut énoncer les principes suivants :

- Principe de surprise : l'effet d'une «émotion» est d'autant plus important qu'elle est en opposition avec celle attendue.
- Principe d'accoutumance : l'effet d'une «émotion» est d'autant moins important que celle-ci était attendue.

Ces deux principes établissent donc la variation quantitative de la connexion comme étant fonction non seulement des conséquences immédiates de ses actions mais également des exercices passés et donc des effets attendus pour le comportement présent.

### MISE EN ŒUVRE DANS L'ALGORITHME BUCKET BRIGADE

Ces deux principes sont mis en œuvre dans l'algorithme B.B. En effet, la formule qui gère les variations de la force du ième classifieur est :

$$S_{t+1}^i = S_t^i - Bid_t^i + Bid_t^{i+1}$$

dans laquelle  $Bid_t^i$  représente le paiement de l'offre et  $Bid_t^{i+1}$  la récompense reçue par le ième classifieur ; cette récompense est donnée soit par le classifieur suivant dans la séquence soit par l'environnement pour le dernier classifieur.

En général, on suppose que l'offre est proportionnelle au capital :

$$Bid = c_{bid} * S$$

où  $c_{bid}$  est un coefficient constant compris entre 0.1 et 0.4.

On obtient finalement :

$$S_{t+1}^i = (1 - c_{bid}) * S_t^i + c_{bid} * S_t^{i+1}$$

Si nous considérons la dernière action de la séquence, sa force est mise à jour selon la formule :

$$S_{t+1}^n = (1 - c_{bid}) * S_t^n + c_{bid} * Reward$$

la variation de cette force  $\Delta S = S_{t+1}^n - S_t^n = c_{bid} * (Reward - S_t^n)$  est proportionnelle à la différence entre la récompense et la force qui est à l'origine de cette récompense ; il existe une relation directe de cause à effet entre la valeur de la force et la valeur de la récompense. La variation de la force est donc d'autant plus importante que la récompense infirme cette force ; de même, elle est d'autant plus faible que la récompense la confirme.

Si l'on considère maintenant une action quelconque de la séquence, sa force est mise à jour selon la formule :

$$S_{t+1}^i = (1 - c_{bid}) * S_t^i + c_{bid} * S_t^{i+1}$$

la variation

$$\Delta S = S_{t+1}^i - S_t^i = c_{bid} * (S_t^{i+1} - S_t^i)$$

est proportionnelle à la différence entre la force du successeur dans la séquence et la valeur courante de la force. La force du successeur est donc considérée ici comme la valeur attendue ; c'est-à-dire la valeur qui sert de référence pour déterminer s'il y a surprise ou accoutumance. Pour justifier ce point il faut rappeler que lors de l'apprentissage toutes les forces de la séquence solution convergent vers une même limite égale à la récompense ; la force des actions proches de l'issue convergent plus rapidement que celles des premières actions de la séquence. Ainsi, dans une séquence solution on peut considérer que la force d'une action est moins "bonne" que celle de son successeur dans le sens où elle est plus éloignée de la valeur limite ; il paraît donc raisonnable de prendre cette dernière comme référence. La variation de la force est donc d'autant plus importante que la force du successeur infirme la force ; de même, elle est d'autant plus faible que cette valeur confirme la force. Ces deux principes, surprise et accoutumance, confèrent aux S.C. une grande versatilité : un tel système est capable de se remettre en cause dans la mesure où il prend «conscience» de son inadéquation avec l'environnement.

### 3. ROBUSTESSE ET ATTRIBUTION DE RECOMPENSES

L'effet de surprise/accoutumance mis en évidence dans l'algorithme Bucket Brigade a également été modélisé dans le système MAGE que nous avons développé [BIO90], [COL90]. Alors que les systèmes de classifieurs sont basés sur une approche génétique de l'adaptation d'un système à son environnement, MAGE s'inspire des travaux effectués en psychologie. Il s'agit là encore d'un système en situation de résolution de problèmes et en interaction avec son environnement (cycle Question, Réponse, Sanction). Les connaissances (c) sont des transitions d'état auxquelles sont associés des paramètres numériques, les métaconnaissances discriminantes d(c), dont les valeurs sont utilisées en résolution de conflits et modifiées, suite à une sanction, par application de principes d'apprentissage. Les principes utilisés implémentent certaines lois behavioristes (loi de l'effet, loi de l'exercice, loi de surprise/accoutumance, propagation de l'effet ...). Contrairement aux systèmes de classifieurs où la propagation de la récompense est réalisée implicitement par l'algorithme Bucket Brigade (processus local), dans MAGE, la variation des métaconnaissances discriminantes est calculée indépendamment de celle de son voisin dans la séquence constituant la réponse par l'application d'une fonction explicite de propagation de la sanction. La variation de la métaconnaissance discriminante qui implémente l'effet de surprise/accoutumance sur une connaissance c, est donnée par :

$$\Delta d(c) = \alpha * (1 - \sigma(S) d(c)) * S(c)$$

où S(c) est la sanction perçue par la connaissance c ; elle représente la valeur que devrait avoir d(c) au vu de la réponse. Ainsi, ce qu'il reste à apprendre peut s'exprimer par 1 - d(c) si la sanction est dans l'intervalle ] 0 , 1] et 1 + d(c) si elle appartient à [-1, 0].  $\sigma(S)$  représente le signe de S(c) et  $\alpha$  est un coefficient de proportionnalité permettant à d(c) de conserver une valeur comprise entre -1 et 1.

Une différence fondamentale entre ce mécanisme et celui utilisé dans le Bucket Brigade réside dans la notion de robustesse ou capacité d'un système à résister aux aléas de son environnement. Un système qui apprend doit être de moins en moins sensible à son environnement et cela est d'autant plus nécessaire que les mécanismes d'apprentissage s'appuient sur l'effet de surprise. Dans MAGE, l'effet de surprise/accoutumance est pondéré par une mesure de son degré d'apprentissage.

Le taux de succès peut être considéré comme une mesure de ce degré. Nous avons donc choisi le coefficient  $\alpha = (1 - \rho(c))$ , où  $\rho(c)$  est la robustesse de  $c$  représentée par le taux de succès du système et donc initialement nul.

$\Delta d(c)$  est donc une fonction décroissante de la robustesse  $\rho(c)$ , ce qui permet d'obtenir un système dont la versatilité décroît avec le niveau de compétence.

En ce qui concerne la propagation de la sanction sur les connaissances utilisées pour produire la réponse, nous avons choisi dans MAGE une fonction qui modélise des comportements établis en psychologie expérimentale. Le choix de la fonction repose sur l'idée que l'apprentissage est d'autant plus rapidement réalisé que la connaissance sur laquelle il porte est "proche" de l'issue. Une connaissance directement impliquée dans la réponse (elle en constitue la "cause triviale") va voir sa métaconnaissance discriminante varier plus rapidement que les autres mcd des connaissances ayant participé à l'élaboration de la réponse ; ce mécanisme se retrouve implicitement dans l'algorithme Bucket Brigade.

Nous avons choisi :

$$F(S, c_i) = \frac{S'}{n-i+1}$$

$S'$  est la sanction perçue par le système,  $n$  est le nombre de connaissances ayant participé à l'élaboration de la réponse et  $c_i$  est la connaissance de profondeur  $i$ . Lorsque  $i = n$  on a  $S(c_n) = S'$  (cause triviale).

Afin de doter les systèmes de classifieurs (algorithme Bucket Brigade) de cette propriété de robustesse, nous proposons de faire varier dynamiquement le coefficient  $c_{bid}$  en fonction du taux de succès du système. Le  $c_{bid}$  diminue lorsque le taux de succès augmente selon la formule  $c_{bid} = 0.1 * (1 - \text{taux\_succès})^p$  dans lequel  $p$  est un nombre entier.

Plusieurs tests ont été réalisés sur un système de 180 classifieurs (jeu du "saute ou glisse" à sept positions) dans un environnement bruité. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec  $p = 6$ . Alors que dans le cas où le  $c_{bid}$  est constant le système ne converge pas toujours (après 300 parties), dans le cas d'un  $c_{bid}$  dynamique, la convergence en environnement bruité est toujours atteinte (après la 32<sup>ème</sup> partie), le taux de succès étant de 89.63%. Une comparaison a été établie avec les résultats obtenus par MAGE.

Indépendamment de la robustesse du système, le fait d'utiliser un  $c_{bid}$  dynamique induit deux conséquences qui ont été constatées dans les tests effectués avec un environnement non bruité : la vitesse de rétro-propagation augmente (la force du premier classifieur varie plus rapidement) et la vitesse de convergence est plus élevée (convergence après 21 parties alors que dans un  $c_{bid}$  constant le système n'a toujours pas convergé après 300 parties).

## CONCLUSION

Cet article a présenté, dans le cadre de l'adaptation d'un système à son environnement, la composante apprentissage en écartant le problème de la génération des règles ; dans les systèmes génétiques, l'évolution de la population est réalisée grâce à des opérateurs tels que la mutation, le croisement ou la reproduction. Dans MAGE, la génération est faite par instanciation de schémas génériques représentant les règles d'une application donnée. Dans les deux cas, les composantes évolution et apprentissage sont étroitement liées dans la mesure où la génération de nouvelles règles dépend des forces et celles-ci sont mises à jour par apprentissage. Appliquant la démarche proposée dans MAGE à l'algorithme Bucket Brigade, nous avons montré qu'une variation dynamique du coefficient  $c_{bid}$  en fonction du taux de succès permet au système d'être robuste et augmente de façon significative sa vitesse de convergence. Il serait intéressant d'étudier l'influence de cette modification sur la génération des règles dans le cadre d'un système de classifieurs et en particulier de montrer que la robustesse est également un critère satisfaisant de terminaison de l'évolution d'un système génétique.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [BEL 89] Belew R.C.  
Back propagation for the Classifier System. Proceedings of ICGA 89.
- [BIO 90] Biondi J.  
MAGE : un modèle d'apprentissage général.  
Thèse de doctorat d'état Es-Sciences, Université de Nice-Sophia Antipolis 1990.
- [COL 90] Collard P.  
L'apprentissage discriminant dans MAGE : un modèle d'apprentissage général. Thèse de doctorat, Mention Informatique, Université de Nice-Sophia Antipolis 1990.
- [DOR 91] Dorigo M.  
Message-Based Bucket Brigade : An Algorithm for the Apportionment of Credit Problem.  
EWSL 91, Porto, Portugal
- [GOL 89] Goldberg D.E.  
Genetic algorithms in search, optimization and machine learning Addison-Wesley, 1989.
- [GRU 87] Grumbach A.  
Contribution à l'étude de modèles d'apprentissage en interaction avec un environnement inspiré du comportement humain. Thèse de doctorat d'état, Mention Informatique, Orsay 1987.
- [HOL 75] Holland J.H.  
Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [HOL 78] Holland J.H. & Reitman J.S.  
Cognitive systems based on adaptative algorithms.  
Pattern directed inference systems, Waterman & Hayes-Roth (Eds), Academic Press, 1978.
- [HOL 85] Holland J.H.  
Properties of the bucket brigade.  
Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, 1985
- [HOL 86] Holland J.H.  
Escaping brittleness : the possibilities of general purpose learning algorithms applied to parallel rule-based systems.  
Machine Learning II, Michalski, Carbonell & Mitchell (Eds), Los Altos, 1986.
- [HUA 89] Huang D.  
The context-array bucket-brigade algorithm : an enhanced approach to credit-apportionnement in classifier systems.  
Proceedings of an International Conference on genetic Algorithms and their Applications, 1989
- [RES 72] Rescorla R.A. & Wagner A.R.  
Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In Classical Conditioning II : Current Research and Theory  
Ed. A.H. Black and W.F. Prokasy, pp64-99, New York : Appleton-Century-Crofts.
- [WIL 87] Wilson S.W.  
Hierarchical credit allocation in a classifier system.  
Genetic alorithms and simulated annealing, Davis L. (Eds), London, Pitman, 1987.
- [WIL 89] Wilson S.W. & Goldberg D.E.  
A critical review of classifier systems.  
Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, 1989

## **Biomimétisme des Algorithmes Génétiques**

---

jean louis Dessalles  
Telecom Paris - Département Informatique  
46 rue Barrault - 75013 Paris - France  
E-: dessalles@enst.fr

### **Résumé:**

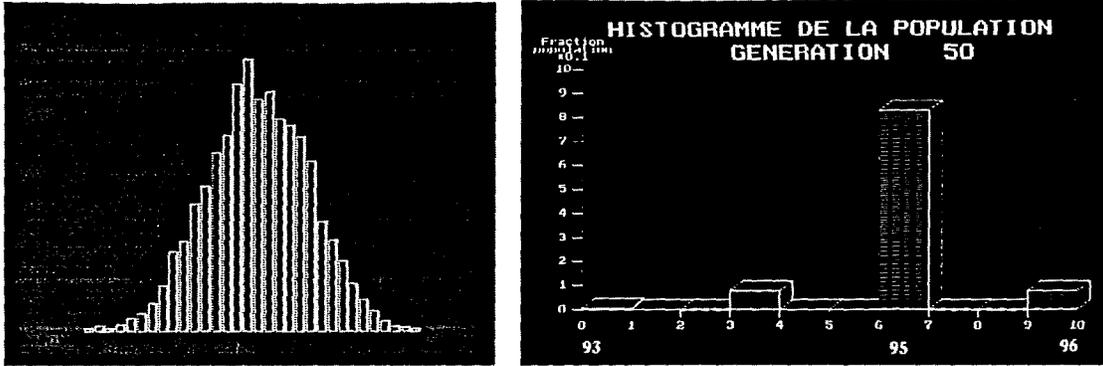
Les algorithmes génétiques apparaissent souvent comme un moyen original de résoudre des problèmes, sans doute à cause de leur généralité et de leur caractère "aveugle": le mécanisme fondamental qu'il mettent en oeuvre (générateur de diversité, redistribution, sélection) est toujours le même et est en principe indépendant du problème posé. Les A.G. sont aussi inhabituels du fait que le choix des caractéristiques retenues dans les diverses implémentations (parmi toutes celles qui sont facilement imaginables) semble avant tout guidé par la métaphore biologique, la sanction de l'efficacité n'intervenant qu'ensuite. Nous proposons ici d'examiner la portée de ce caractère biomimétique, en soulignant quelques ressemblances et différences fondamentales entre les A.G. et le génome des êtres vivants façonné par la sélection naturelle.

### **1. La nécessité de l'hybridation (crossover): gènes et schémas**

Le principe d'un programme "algorithme génétique" est simple: le programme gère un ensemble d'"individus" représentés par leur génome (vecteur généralement binaire). Chaque individu peut être évalué, c'est-à-dire qu'une note (aptitude) lui est attribuée à partir de son génome. La façon de calculer cette note est dictée par le problème à résoudre, et on espère que l'algorithme génétique va construire des individus qui atteignent une aptitude maximum. Pour atteindre cet objectif, on fait dépendre la participation à la descendance de chaque individu de son aptitude: seuls les individus les mieux notés vont (statistiquement) se reproduire.

C'est là qu'intervient la caractéristique fondamentale des A.G.: pour chaque couple de "parents" choisis parmi les individus les mieux notés, on réalise une hybridation de leur génome pour constituer un (ou deux) individu. Cette hybridation est essentielle dans le cadre des A.G., comme l'a montré J.H. Holland dès 1965 ([Goldberg 1989]). Elle constitue une condition nécessaire pour que l'on puisse parler d'algorithme génétique (en son absence, on a plutôt affaire à un tirage aléatoire).

La figure 1 montre un exemple spécialement conçu pour souligner la valeur ajoutée de l'hybridation. Les individus sont notés par la somme des bits de leur génome. L'hybridation permet aux 1 sélectionnés à chaque génération de se regrouper chez les mêmes individus.



**figure 1:** un algorithme génétique est chargé de maximiser la somme de 100 bits. L'histogramme de droite montre le résultat de 50 générations de 100 individus: toute la population se répartit entre les "notes" 93 et 96. Le diagramme de gauche donne, à titre de comparaison, l'histogramme résultant de 5000 tirages aléatoires, qui s'étend entre 34 et 66.

L'hybridation permet au mécanisme sélectif d'opérer non sur les individus, mais, comme le montrait Holland dès 1968, sur des schémas (cf. [Goldberg 1989]). Un schéma est, en théorie, une spécification partielle du génome. En pratique, seuls les schémas spécifiés sur une longueur relativement courte ont quelque chance de ne pas être détruits par hybridation (voir figure 2). Pour un observateur, seuls ces schémas peuvent prétendre constituer des *unités de sélection*. En effet, dire que c'est la population qui est sélectionnée n'a pas de sens. Quant aux individus, ils sont détruits à chaque génération (si on excepte les modèles dits élitistes)! Seuls les schémas assez courts ont une pérennité suffisante pour que l'observateur puisse considérer certains d'entre eux comme sélectionnés après quelques générations.

Le fait que le schéma apparaisse comme l'unité de sélection explique l'efficacité des A.G. en optimisation: on peut montrer qu'à chaque génération, l'évaluation de  $n$  individus équivaut au mieux au traitement de  $n^3$  schémas ("parallélisme implicite" de Holland) ([Goldberg 1989]), c'est-à-dire que dans le meilleur des cas  $n^3$  schémas viables différents sont simultanément présents dans la population (celle-ci doit être aléatoire et de taille adaptée) et sont donc soumis à la sélection.

schéma "viable":         $H = \text{*****1*0*10*****}$   
 schéma non viable:     $H = \text{*10*****0*****1*10****}$

**figure 2:** un schéma spécifie certaines positions sur le génome (\* s'apparie indifféremment avec 1 ou 0). Un schéma trop étendu (i.e. spécifié sur des positions éloignées) ne survivra pas aux hybridations. Les deux exemples ont respectivement 0.81 et 0.19 chances de survivre à un seul point de crossover.

Cette constatation est à mettre en parallèle avec les idées de R. Dawkins, qui a attiré l'attention sur le fait que, rigoureusement, la sélection naturelle n'opérait pas en sélectionnant des individus, encore moins des groupes, mais qu'au contraire elle opérait sur les gènes (cf. [Dawkins 1978, 1982]). Considérés du point de vue du mécanisme de la sélection naturelle, les individus ne sont que des arrangements temporaires de gènes. Seuls les gènes peuvent subsister à travers les générations. De ce point de vue, l'hybridation génomique est donc un

phénomène essentiel. Elle est certes surtout connue chez les êtres vivants sexués, mais on l'a observée aussi chez des unicellulaires qui se reproduisent généralement par division: c'est le phénomène de conjugaison, au cours duquel deux individus hybrident leurs génomes, et donc cessent d'exister en tant qu'individus. Il y a des raisons (à la fois génétiques et chimiques) de penser que, contrairement à ce qui est généralement dit, l'hybridation génomique est aussi ancienne que l'ADN, et qu'elle est généralisée chez tous les êtres vivants, même si on ne l'a pas observée dans tous les cas. Il serait d'ailleurs pratiquement impossible de parler d'espèce en l'absence de rencontre génomique.

## 2. Les contraintes qui pèsent sur le code génétique

L'art d'utiliser les A.G. réside en grande partie dans le codage du problème. Il s'agit pour le concepteur de définir la sémantique du génome, de manière à ce qu'à chaque individu puisse être associée une "note". L'utilisateur des A.G. doit éviter un double écueil:

### *contrainte de non-séparabilité*

- un codage trop simple est souvent révélateur d'un problème trop simple, pour lequel l'emploi des A.G. est superflu. En effet, considérant que le schéma est l'unité de sélection, on pourrait être tenté par une vision simpliste du parallélisme implicite: considérer que des portions de génome constituent des unités sur lesquelles l'évaluation va porter indépendamment. On peut appeler séparable un tel codage. Nous avons rencontré cette situation pour la somme binaire de la figure 1: chaque bit contribue à la "note" indépendamment des autres bits.

Mais cela signifie que le problème, s'il peut être résolu par l'A.G., peut être scindé en autant de sous-problèmes qu'il y a d'unités évaluées indépendamment. Or les problèmes intéressants étant le plus souvent non décomposables, on doit s'attendre à être contraint d'employer des codages non séparables. Ce sera le cas en particulier si le lien génome --> évaluation est complexe, par exemple si l'on utilise des schémas de 2° degré, c'est-à-dire des schémas qui modifient la façon dont sont évalués d'autres schémas (par ex. Lavalou [1990] code sur les premiers bits le nombre de bits à prendre en compte dans une autre portion du génome). On peut certes objecter que le codage peut être séparable, mais que l'A.G. sert justement à le séparer (i.e. trouver les schémas indépendants). Mais il est difficile d'imaginer un codage séparable, et donc nécessairement simple, pour lequel le concepteur n'aurait aucune idée des séparations pertinentes!

Le "codage" des êtres vivants ne souffre certainement pas d'un manque de complexité. La sélection s'exerce par l'intermédiaire du phénotype des individus, et la liaison génome --> phénotype est fort compliquée (cf. par exemple [Petit 1976]): les gènes ont des effets multiples sur le phénotype (pléiotropie) et les caractères phénotypiques résultent de l'action combinée de nombreux gènes. On connaît de plus des gènes du 4° degré (codant pour un répresseur d'un activateur d'un autre répresseur) (cf. [Beardsley 1991]).

### *principe de continuité*

- on peut à l'inverse avoir le sentiment qu'un codage assez complexe pour être non séparable (au sens défini ci-dessus) risquera de ne pas respecter le **principe de continuité**. Ce principe exige que des génomes voisins pour la distance de Hamming (nombre de mutations élémentaires pour passer de l'un à l'autre) aient la plupart du temps des évaluations voisines. Son respect permet la viabilité des hybrides et un minimum de tolérance aux mutations. Manderick [1991] mesure cette continuité par l'autocorrélation des aptitudes lorsque l'on

effectue des mutations élémentaires. Or un codage complexe semble avoir peu de chances d'obéir à ce principe de continuité. Si par exemple une mutation modifie, même légèrement, un schéma du deuxième ordre, de nombreux schémas verront leur contribution à l'évaluation modifiée, et la "note" globale sera sensiblement différente. Comment expliquer que le système naturel qui fonctionne selon un codage très complexe obéisse bien au principe de continuité?

Une première réponse réside dans le caractère **étendu** des gènes naturels. La plupart des gènes naturels fonctionnels codent indirectement pour des molécules complexes, les protéines. Une mutation ponctuelle va par exemple changer un acide aminé en un autre, ce qui va en général légèrement modifier les propriétés chimiques de la protéine, diminuant légèrement sa capacité catalytique pour telle réaction. L'effet a toutes les chances d'être quasiment invisible, voire annulé (synthèse accrue de l'enzyme) au niveau des performances de l'individu. Le problème de nombreux codages, dans les A.G., est de concentrer trop de signification sur chaque bit du génome. Un codage "étendu" devrait permettre à des mutations ponctuelles d'avoir des effets ponctuels.

#### ***maintien de la sémantique***

On conçoit donc que l'équilibre est très difficile à tenir, pour le concepteur, entre la trivialité (codage séparable) et la non-continuité. A cela se rajoute le problème du **maintien de la sémantique** génomique à travers les macro-remaniements génétiques, comme les délétions, les inversions, les translocations, ou les duplications. L'intérêt de telles opérations, qui se produisent dans la nature (quoique très rarement pour certaines), est avant tout de créer des schémas entièrement nouveaux et de rapprocher des schémas utiles de manière à constituer des schémas plus longs. La forme du problème peut parfois se prêter particulièrement bien à de tels remaniements (par ex. le problème du voyageur de commerce). Malheureusement la sémantique de chaque bit du génome dépend généralement de sa position. Pour éviter qu'elle ne soit perdue dans ces remaniements, on décide souvent de totalement découpler l'ordre "géographique" qui définit les relations de voisinage utiles lors de l'hybridation, et qui peut être modifié à volonté, de l'ordre sémantique qui, lui, reste immuable (figure 3). Mais un tel découplage rend la plupart des hybrides non signifiants. Certes la nature peut "se permettre" de tolérer un certain découplage: une délétion dans une région non codante est sans effet sur le reste du génome. Des gènes ou des groupes de gènes (polygènes) peuvent parfois changer de place sans que cela change leur expression ni celle de leur environnement. Mais on ne peut en aucun cas dire que ce découplage a lieu au niveau de la paire de base ou même du codon.

Le choix du code génétique, qui est essentiel pour le traitement du problème posé à un algorithme génétique, doit donc respecter trois contraintes principales qui apparaissent difficiles à concilier : complexité (non-séparabilité), continuité, maintien de la sémantique. Mais ces exigences concernant la *structure* de l'A.G. ne se limitent pas à rendre son codage délicat. Elles ont aussi des conséquences sur son *utilisation* : elles mettent en évidence le fait que l'usage habituel de A.G. est fort peu biomimétique, comme nous allons le voir.

## Crossover

		coupure									
			V								
<i>individu 1</i>	0	1	1		1	0	1	0	0	1	0
<i>individu 2</i>	0	0	1		0	1	1	0	0	0	1
				Λ							
<i>individus</i>	0	1	1		1	0	1	0	0	0	1
<i>hybrides</i>	0	0	1		1	0	1	0	0	1	0

		coupure											
			V										
<i>individu 1</i>	4	6	0		5	7	8	9	1	2	3	<----	ordre sémantique (locus): numéro du bit
<i>individu 1</i>	0	1	1		1	0	1	0	0	1	0	<----	valeurs des bits, dans l'ordre "géographique"
<i>individu 2</i>	1	8	9		4	3	2	0	5	6	7		
<i>individu 2</i>	0	0	1		0	1	1	0	0	0	1		
				Λ									
<i>hybrides</i>	4	6	0		4	3	2	0	5	6	7		
<i>non</i>	0	1	1		0	1	1	0	0	0	1		
<i>signifiants</i>	1	8	9		5	7	8	9	1	2	3		
<i>signifiants</i>	0	0	1		1	0	1	0	0	1	0		

**figure 3:** Dans le cas d'un découplage gène/locus, les hybrides obtenus par crossover classique ont toutes les chances d'être non signifiants (loci manquants ou dupliqués).

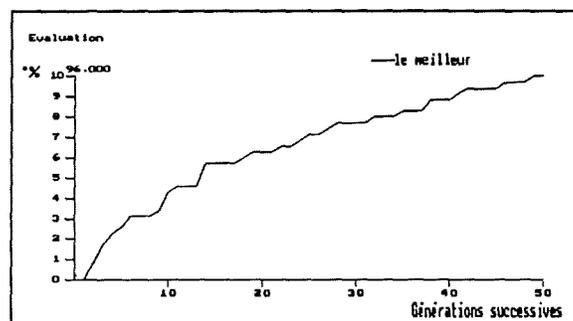
### 3. Populations aléatoires ou quasi-homogènes ?

Les algorithmes génétiques croisent des individus complètement différents. Dans la plupart des utilisations, la population de départ est tirée aléatoirement, et on considère que l'A.G. a pratiquement convergé lorsque la population est quasi-homogène. La fin de l'optimisation est parfois traitée différemment à cause de la lenteur du processus génétique: dans une population quasi-homogène, l'hybridation perd son rôle prépondérant, au profit de la mutation.

Or dans la nature, les individus interféconds partagent au moins 99% de leur génome, et la plupart des différences sont phénotypiquement neutres! Cette constatation explique pourquoi le codage extrêmement complexe génotype --> phénotype, avec notamment des gènes de degré élevé, reste compatible avec une continuité des changements dus à l'hybridation: celle-ci crée relativement peu de modifications (quantitativement et qualitativement) dans le génome des descendants.

Ceci remet en question le caractère biomimétique des algorithmes génétiques tels qu'ils sont couramment utilisés. Si le codage était raisonnablement complexe, le tirage aléatoire de départ donnerait des individus non interféconds (non signifiants ou d'aptitude beaucoup trop faible). Certes on pourrait voir dans les A.G. la représentation des seuls 1% de gènes variables d'une population naturelle (environ 1000 gènes pour des mammifères). Mais même en cas de changement brusque d'environnement, seule une infime partie de ces gènes est susceptible d'acquérir une nouvelle signification évolutive, contrairement à ce que l'on souhaite dans le cas des A.G.

En fait, les A.G. sont surtout biomimétiques lorsqu'ils paraissent moins intéressants, c.à.d. à la fin de la convergence, lorsque la population commence à devenir homogène et que le parallélisme implicite ne joue plus; autrement dit lorsque le rôle créateur des mutations devient prépondérant par rapport à la redistribution due à l'hybridation (figure 4).



**figure 4:** ce schéma montre que la convergence de l'A.G. de la figure 1 a une tendance asymptotique. La seule redistribution due à l'hybridation ne permet pas d'atteindre l'optimum (les 100 bits à 1). Certes on n'a que  $[1 - (1 - 1/2^{100})^{100}] \cong 10^{-28}$  chance qu'un quelconque des loci soit à 0 chez les 100 individus de départ. Mais dès la première génération, si 10% des individus participent à la reproduction, on a déjà 0,1 chance d'avoir un locus à 0 dans toute la population. Dans l'essai ci-dessus, qui met en oeuvre un modèle élitiste, il semble que 4 loci restent à 0 après les 50 générations. Si  $p_m$  est la probabilité de mutation, on a  $[1 - (1 - p_m)^4] \cong 4 \cdot p_m$  chance qu'un individu donné acquière un 1 sur l'un de ces 4 loci à la prochaine génération. On peut donc calculer que sur un nombre de générations proche de  $1/10p_m$  la mutation a de bonnes chances de changer les 4 bits de 0 à 1. L'idée consistant à augmenter  $p_m$  se heurte à deux obstacles: ici, au dessus de  $10^{-3}$ , son pouvoir destructeur ne peut plus être "effacé" par la redistribution. Ensuite, un taux de mutation trop élevé est d'une manière générale incompatible avec un codage complexe.

La limitation habituelle de l'utilisation des A.G. à la phase de redistribution est regrettable: les A.G. perdraient beaucoup de leur légitimité (parmi toutes les méthodes d'optimisation imaginables) en renonçant à leur composante biomimétique qui réside principalement dans le rôle joué par les mutations. Ne pourrait-on imaginer d'utiliser les A.G. avec des codages complexes (ce qui exclut de démarrer avec une population aléatoire), pour résoudre des problèmes vraiment difficiles en faisant confiance au pouvoir créateur des mutations? Là encore, le meilleur moyen de cerner ce pouvoir de création est de le comparer

à celui de la contrepartie naturelle.

#### **4. Le pouvoir créateur des algorithmes biomimétiques**

Le pouvoir créateur des mécanismes sélectifs est très souvent invoqué. La théorie de la sélection naturelle de Darwin rend compte de la diversité et de l'adaptation des êtres vivants. La théorie de la sélection clonale énoncée par M. Burnet en 1955 explique la réponse immunitaire. Edelman ou Changeux invoquent des mécanismes sélectifs pour expliquer certains aspects de la connectivité neuronale et suggèrent même que des mécanismes sélectifs puissent être à la base de la cognition (cf. [Changeux 1989]). On peut même concevoir le progrès scientifique comme mû par un système de mutation/sélection (cf. [Walbridge 1989]).

Le fonctionnement de tels systèmes sélectifs est toujours le même: un générateur de diversité aveugle (i.e. indépendant du - et antérieur au - "problème posé"), et un mécanisme de sélection. Les algorithmes génétiques, qui opèreraient sur des populations quasi-homogènes, répondent à cette définition.

Le pouvoir créateur généralement prêté aux systèmes sélectifs est hérité de la métaphore génétique: la sélection naturelle a été capable de façonner des êtres fort divers capables de survivre dans toutes sortes d'environnements. Peut-on espérer, toute proportion gardée, un pouvoir créateur de même nature pour les algorithmes biomimétiques? Il faut tout de même garder à l'esprit un fait essentiel qui différencie la sélection naturelle de tous les autres systèmes sélectifs mentionnés précédemment (immunologie, A.G., etc.). Celle-ci opère sur des individus dont le génome code non seulement pour un phénotype (qui sera évalué en termes de succès reproductif), mais aussi pour l'appareil qui confère une sémantique à ce génome.

Dans le cas des A.G., la sémantique d'un schéma donné échappe en grande partie, voire en totalité, au génome. Si l'on prend l'exemple d'un A.G. capable de composer de la musique (cf. [Lavalou 1990]), une suite de 5 bits du génome ayant une influence par exemple sur la forme d'un thème n'a aucune chance d'influer sur le taux de récursivité (un motif musical peut récursivement être substitué à une note). Autrement dit, il est strictement impossible d'imaginer une combinaison de mutations, où que ce soit dans le génome, qui puisse changer ainsi la sémantique de ces cinq positions.

La sémantique du génome des êtres vivants, en revanche, est sous le contrôle du génome lui-même. Et cette sémantique peut être modifiée par le système mutation/sélection. Il est improbable, en pratique, qu'elle puisse changer aux niveaux les plus bas (la remise en cause du code génétique 64 --> 20 proprement dit provoquerait certainement bien trop de bouleversements), mais dans les relations gène - gène et gène - caractère phénotypique. Si par exemple on trouve qu'une séquence de 5 paires de bases influe sur la couleur des yeux, il est toujours théoriquement possible d'imaginer un ensemble de mutations, ailleurs dans le génome, qui lui permette de contrôler cette fois la taille des canines! Le génome des êtres vivants est le seul exemple connu de système évolutif dans lequel les gènes contrôlent leur propre sémantique.

Si on définit le phénotype des A.G. comme un ensemble de paramètres intermédiaires, calculés à partir du génome, et entrant comme arguments dans la fonction d'évaluation, il semble donc que "l'enveloppe génétique" d'un A.G., i.e. l'ensemble des phénotypes

accessibles, soit fini et figé, ce qui limite leur pouvoir "créateur" de l'algorithme. En revanche leur pouvoir d'adaptabilité par extraction statistique (on peut même parfois parler d'apprentissage, notamment lorsque les A.G. sont utilisés pour alimenter des classifieurs en règles nouvelles (cf. [Farmer 1990])) est suffisamment étonnant pour que l'on continue à leur chercher de nouvelles applications. L'un des objectifs de cette contribution était de suggérer que les algorithmes génétiques nous étonneront d'autant plus qu'ils seront biomimétiques, c.à.d. qu'utilisant des codages complexes et opérant sur des populations quasi-homogènes, ils pourront sélectionner des solutions pour des problèmes formulés de manière trop complexe pour les méthodes d'optimisation classiques.

**remerciements:** Alain Grumbach, Irène Fournier et Olivier Hudry ont bien voulu relire une première version de ce papier et prodiguer des conseils éclairants. Qu'ils en soient remerciés.

### références

Beardsley Tim (1991): La régulation des gènes, Pour la Science n°168, 1991, 54-64

Changeux Jean-Pierre, Dehaene Stanislas (1989): Neuronal models of cognitive functions, Cognition, 33, 1989, 63-109

Dawkins Richard (1978): Le gène égoïste, Editions Menges, 1978

Dawkins Richard (1982): The Extended Phenotype - The Gene as the Unit of Selection, W.H. Freeman & Co, Oxford 1982

Farmer J. Doyné (1990): A Rosetta Stone for Connectionism, Physica D 42, North-Holland, 1990, 153-187

Goldberg David E. (1989): Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison Wesley Publishing Company, USA 1989

Lavalou Gilles (1990): Application des algorithmes génétiques à la génération de séquences musicales, Dossier long de fin d'études, ENST, Paris 1990

Manderick B. (1991): State of the art in theoretical approaches to genetic algorithms, Conférence du 05 déc. à l'Ecole Normale Supérieure, Paris 1991

Petit Claudine, Zuckerkandl Emile (1976): Evolution: Génétique des populations, évolution moléculaire, Hermann, Paris 1976

Walbridge Charles T. (1989): Genetic Algorithms: What Computers Can Learn from Darwin, Technology Review, 1989, 47-53

# Catégories

# MoHA, un Modèle Hybride d'Apprentissage

*qui s'appuie sur la perception de l'environnement  
par un individu*

Françoise Forest  
Brigitte Grau

LIMSI - CNRS  
BP 133  
91403 Orsay Cedex

## RESUME

*L'objet de cette contribution est la présentation d'un modèle dynamique d'apprentissage. Il combine, à l'intérieur d'une architecture constituée de trois niveaux principaux le traitement massivement parallèle de données en vue de l'émergence de concepts stables, et la manipulation symbolique de ces concepts dans des schémas qui représentent les connaissances pragmatiques qu'un individu peut se construire à partir de son expérience.*

*En nous inspirant des travaux de Vygotsky, nous faisons l'hypothèse que les concepts quotidiens et les connaissances pragmatiques se construisent à partir de l'expérience acquise, notamment par l'accumulation et le traitement d'observations sur des événements du monde réel et par des réajustements à partir des informations déjà abstraites.*

## INTRODUCTION

Nous nous situons dans le domaine de l'acquisition de connaissances sémantiques et pragmatiques à partir de données linguistiques. C'est l'évolution des connaissances d'un individu, au fur et à mesure de l'enrichissement de son expérience, qui constituera le coeur de notre modèle [Vygotsky 85]. Nous considérons que l'apprentissage ne se réduit pas à des processus ascendants, des perceptions vers des connaissances abstraites de différents types, mais qu'il nécessite de mettre en relation l'information nouvellement acquise avec les connaissances déjà structurées, celles-ci guidant le processus d'apprentissage au moyen d'interactions descendantes entre les différents niveaux.

Nous considérons également que l'apprentissage n'est pas un processus séparé des autres processus impliqués dans un système de compréhension, mais qu'il intervient de façon continue, tandis que l'expérience de l'individu s'enrichit.

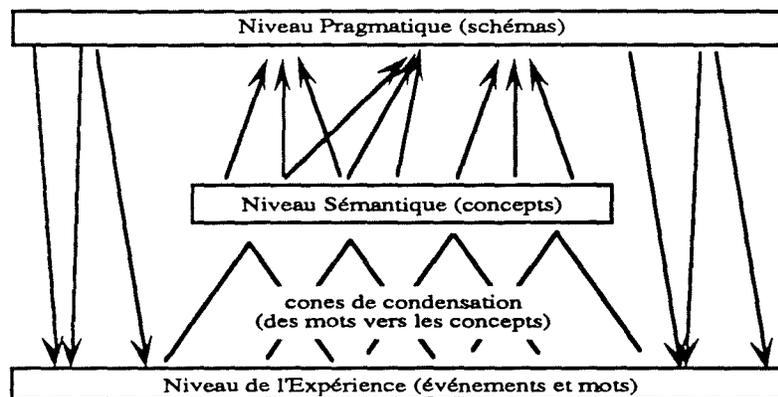
C'est dans l'objectif de modéliser ces phénomènes que nous proposons MoHA, un modèle hybride qui combine une approche numérique et une approche symbolique. La première approche consiste en un traitement massivement parallèle d'événements du monde réel tels que les perçoit, verbalement, un individu. Ces événements et leur perception verbale sont représentés dans un réseau de type

connexionniste dans lequel notre objectif est de faire émerger des attracteurs qui constituent les concepts "stables".

La deuxième approche est symbolique. Les concepts interviennent dans des informations de type pragmatique que nous représentons sous forme de schémas. L'apprentissage incrémental de ces schémas s'effectue à l'aide de traitements symboliques tels que l'analogie, la généralisation et la spécification.

Nous définissons ainsi trois niveaux qui représentent les différents degrés d'intégration de l'expérience acquise par l'individu. Les éléments des différents niveaux sont associés par des liens montants ou descendants qui permettent d'opérer les interactions : les nouvelles perceptions peuvent participer au renforcement de concepts et de schémas existants, ceux-ci pouvant inversement servir à interpréter de nouvelles perceptions.

### LES TROIS NIVEAUX DE MoHA



Les trois niveaux de représentation des connaissances et leurs liaisons

#### le niveau de l'expérience

L'individu perçoit des événements du monde réel, certains étant plus saillants que d'autres. Les primitives de perception interviennent de façon plus ou moins forte dans la construction de l'image qu'il s'en fait. *Nous faisons l'hypothèse que les primitives de perception sont des mots* et que les images sont des énoncés associés à chacun des événements<sup>1</sup>. L'ensemble des événements et de leurs images constituent un graphe dans lequel ces différents degrés de saillance sont représentés par des valeurs numériques attachées aux sommets et aux arcs [Forest 90].

#### le niveau sémantique

Il est représenté par un réseau sémantique classique inspiré des graphes conceptuels de Sowa [Sabah & Vilnat 91]. Les concepts sont reliés aux mots du niveau de l'expérience qui participent à leur formation (au fur et à mesure de l'enrichissement de l'expérience, ces concepts évoluent donc nécessairement), ils sont également reliés aux situations représentées dans le niveau supérieur (niveau pragmatique).

<sup>1</sup>Les mots *ne sont pas* directement des primitives de perception, cependant, nous ferons cette hypothèse, dans la mesure où notre modèle se situe dans le domaine de l'informatique linguistique.

### le niveau pragmatique

C'est un ensemble de situations prototypiques réunies dans un graphe de schémas [Grau 84]. Ces situations sont la généralisation d'événements particuliers perçus au niveau de l'expérience. Inspiré des MOP's de Schank [Schank 82], ce choix permet de détailler plus ou moins les situations, la valeur associée à chaque facette renvoyant à d'autres schémas ou à des concepts.

Les liens permettent à chaque niveau d'influencer l'organisation des deux autres et autorisent la navigation entre eux au cours du processus de compréhension. Cette faculté est très importante parce que :

- les niveaux représentent différents types d'abstraction,
- il devient possible de modéliser le développement des connaissances simultanément à l'enrichissement de l'expérience,
- les abstractions étant des généralisations, des informations particulières peuvent se perdre, c'est pourquoi il peut être nécessaire de redescendre au niveau de l'expérience pour affiner la compréhension.

### DESCRIPTION DU COMPORTEMENT DE MoHA

Notre formulation permet d'aborder le problème de la stabilité et de la plasticité des concepts. La structure générale s'auto-organise au cours de l'acquisition de nouveaux événements. Les concepts évoluent par le renforcement ou le déplacement des cônes au dessus desquels ils sont construits. Si le déplacement est trop important, nous dirons que la limite de plasticité est dépassée. Il faut alors réorganiser le niveau sémantique à partir de l'expérience toute entière. L'importance de cette réorganisation sera appréciée par un superviseur dont un des rôles est de maintenir la cohérence du niveau pragmatique. Ce phénomène implique pour notre modèle deux modes de fonctionnement : le mode normal de traitement des nouveaux événements, le mode "mise-à-jour" du niveau sémantique.

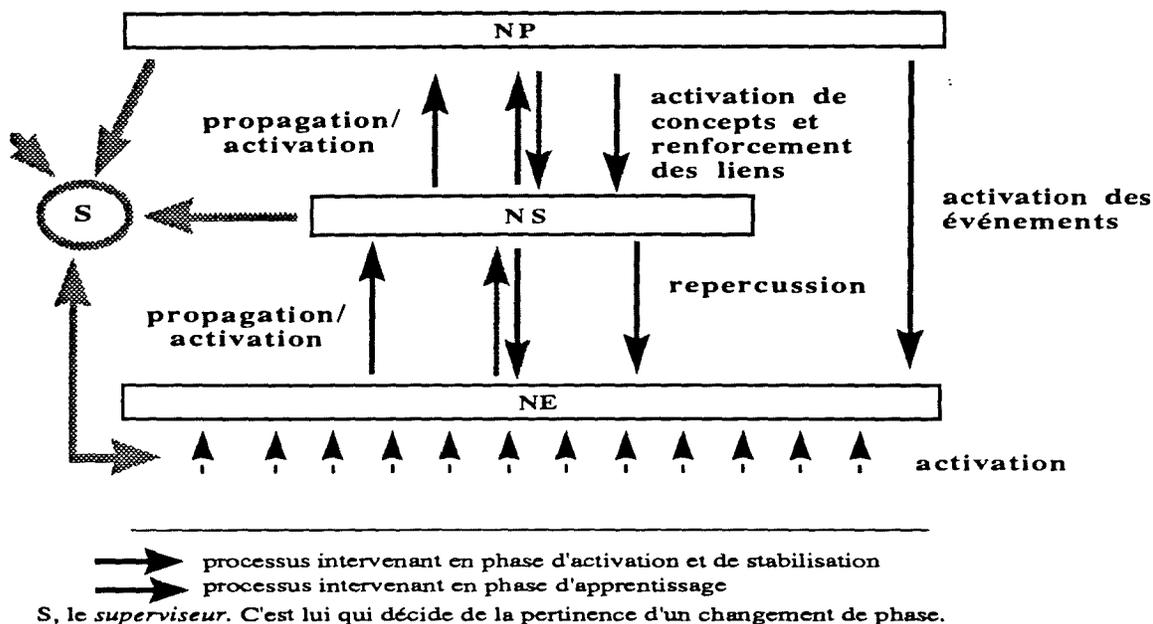
- Les interactions montantes interviennent dans la création et la réorganisation du niveau sémantique. Nous utilisons une approche connexionniste. Ce sont des propagations d'activation dans le niveau de l'expérience qui conduiront à la détection des concepts stables. Le résultat de la propagation dépend en particulier des données numériques introduites pour représenter les événements. C'est pourquoi notre objectif actuel est d'utiliser certaines techniques classiques d'analyse des données<sup>2</sup>, reformulées en terme de propagation dans des réseaux, sur des ensembles significatifs de données [Forest 91]. Ce travail s'appuyera notamment sur des résultats obtenus par [Crucianu & Memmi 91] sur l'extraction de structures implicites dans des réseaux connexionnistes.

- Le processus d'apprentissage incrémental est actif, quant à lui, chaque fois qu'un nouvel événement est perçu. Il a pour but d'"interpréter" ce nouvel

---

<sup>2</sup>Des arguments psychologiques plaident pour des connexions non symétriques dans le niveau de l'expérience, mais ce choix pose des problèmes lors de l'utilisation de techniques comme la méthode des nuées dynamiques ou l'analyse en composantes principales.

événement en tenant compte de toute la connaissance déjà acquise. L'approche utilisée est assez proche de celle de Grossberg [Grossberg 87]. Cependant, elle suppose qu'on dispose déjà de quelques concepts stables et d'un ensemble de schémas auxquels les nouvelles connaissances vont pouvoir se rattacher. Cela impose une étape préalable d'initialisation du niveau pragmatique.



### Les différents processus concernés par la perception d'un nouvel événement

Les énoncés contribuant à la perception verbale d'un nouvel événement participent à la mise-à-jour de NE. Une activation dans NE est déclenchée. Les activations propagées dans NE entraînent également une propagation d'activation vers NS et conduisent de proche en proche à l'activation d'un certain nombre de schémas. Des processus symboliques de compréhension du langage naturel sont alors déclenchés en vue d'interpréter les énoncés de départ [Grau 84].

Si une interprétation est possible, certains schémas sont sélectionnés et une activation est "rétro-propagée" vers les niveaux inférieurs, ceci jusqu'à l'obtention d'une certaine stabilité globale de la structure.

Si l'étape d'interprétation symbolique échoue, le modèle est alors en situation d'apprentissage. Il s'agit alors d'essayer de créer de nouveaux schémas en étudiant les concepts actuellement activés par les énoncés et leur relation aux concepts utilisés dans les schémas actuellement actifs. L'utilisation de processus symboliques (analogie, généralisation, spécialisation...) permettra de proposer la création de nouveaux concepts ou de nouvelles relations entre concepts [Grau & Sabah 85] qui pourront aboutir à une réorganisation partielle de NS et NP. C'est le superviseur qui devra intervenir pour prendre ce type de décision.

### CONCLUSION

Nous avons présenté ici les objectifs principaux et les caractéristiques importantes de MoHA. Nous sommes actuellement dans la phase d'implantation des processus

d'activation et de propagation, d'une part sur une machine séquentielle classique (SUN), d'autre part sur une machine massivement parallèle (Connection Machine).

Une des utilisations envisagées pour notre système est son intégration dans une architecture générale de traitement du langage naturel [Sabah 90], à l'intérieur de laquelle il permettra de traiter tous les aspects liés à l'évolution des connaissances en fonction de l'expérience acquise. La notion de communauté linguistique interprétée comme l'expérience commune à plusieurs individus nous apparaît être également une voie intéressante de développement de notre modèle.

## BIBLIOGRAPHIE

[Crucianu & Memmi 91] CRUCIANU M. & MEMMI D., *Extraction de la structure implicite dans un réseau connexionniste*, Notes & rapports internes du LIMSI, Octobre 1991

[Forest 90] FOREST F., *Le sens d'un énoncé est fondamentalement lié à l'expérience de l'individu qui le perçoit*, 4ème colloque de l'ARC, Paris, 28-30 Mars 1990

[Forest 91] FOREST F., *Le traitement massivement parallèle des données dans le domaine de la représentation du sens en langage naturel*, Notes & rapports internes du LIMSI, Novembre 1991

[Grau 84] GRAU B. *Stalking coherence in the 'topical' jungle*, International conference on the fifth generation computer systems, Tokyo, 1984.

[Grau & Sabah 85] GRAU B. & SABAH G., *Vers un apprentissage automatique de connaissances pragmatiques*, Cognitiva, Paris, 1985.

[Grossberg 87] GROSSBERG S., *Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance*, Cognitive Science, 11, pp23-63, 1987

[Sabah 90] SABAH G., *CARAMEL: A flexible model for interaction between the cognitive processes underlying natural language understanding*, Coling, Helsinki, 1990.

[Sabah & Vilnat 91] SABAH G. & VILNAT A., *Flexible case structure implemented into a deterministic parser*, 6th International Workshop on Conceptual Graphs, SUNY at Binghamton (NY), 1991

[Schank 82] SCHANK R.C., *Dynamic memory*, Cambridge University Press, 1982

[Vyotsky 62] VYGOTSKY L.S., *Pensée et langage*, Editions sociales, Paris, 1985

# Acquisition et évolution des systèmes de catégorisation. Apports empiriques à partir des tâches de classification chez les enfants.

Journées de Rochebrune. Savoie, 20-24 Janvier 1992.

Herminia Peraita.  
UNED. Madrid.

Fco. J. ARIAS.  
U. N. E. D.

## RESUME

Ce travail prétend susciter une série de réflexions en se centrant sur une dichotomie de base dans le domaine de l'acquisition de la connaissance dans les termes dans lesquels la pose la Psychologie Cognitive actuelle. Cette dichotomie se situe entre, d'une part, la fonction des restrictions du système humain de la connaissance hypothétiquement-présentes ab initio - théories, d'après certains auteurs, (Carey, 1985, 1991; Murphy et Medin, 1985)- et, d'autre part, la fonction du processus de détection de similarités et de régularités -analogies- qui mettent en marche et déclenchent le processus d'induction comme origine de toute connaissance, mais à partir d'un système vide.

Ces réflexions sont réalisées à partir de deux ensembles de données procédent de travaux empiriques, obtenues, d'une part, à partir de tâches de classification d'objets par des sujets aveugles et par des sujets voyants, et d'autre part, à partir de tâches de classification d'énoncés linguistiques par des enfants d'âges, contextes socio-culturels et système d'instruction différents.

On discutera les résultats dans le cadre de la dichotomie théorique citée antérieurement et on argumentera le besoin d'intégrer les deux approches théoriques, dans la ligne des apports de Keil, 1991. On discutera aussi par ailleurs plusieurs approches sur le thème de la catégorisation. (Dubois, 1991).

## INTRODUCTION

L'évolution des systèmes de classification tout au long de la vie d'un sujet, -ainsi que tout au long de l'évolution scientifique et culturelle-, est un fait tout-à-fait remarquable par sa complexité, qui implique de considérer les catégories comme des structures dynamiques et mobiles et non pas statiques et figées. C'est également remarquable parce que la restructuration des systèmes de classification est un processus complexe et très coûteux en termes cognitifs et sociaux, puisqu'une série de forces tendent à éviter les changements. (Markman, 1989).

Cependant, simultanément, une série de facteurs font pression pour que cette réorganisation ait lieu, comme l'expérience de l'environnement, l'évolution ou l'apprentissage de nouvelles stratégies cognitives, le développement de la connaissance linguistique, l'acquisition de nouvelles perspectives ou de nouvelles théories sur le monde, le but ou la fonction du système de classification, etc.

Cela dit, en termes généraux, l'évolution des systèmes de classification provient, dans le sens d'une constatation plus minutieuse et nuancée, des différences et des similitudes entre différentes classes, bien que l'on ne doive pas interpréter

ces notions dans le sens de différences et similitudes exclusivement perceptuelles, -comme c'était le cas avec les théories classiques sur la catégorisation- il se pourrait qu'une restructuration de nos "théories sur le monde" détermine une nouvelle manière de détecter ces similitudes et différences entre les différentes classes.

Etant donné d'une part, la complexité du processus de catégorisation et, d'autre part, le succès ou les réussites que les enfants obtiennent dès le bas-âge à travers ce processus, nous suggérons dans ce travail d'aborder quelques uns des mécanismes explicatifs que l'on a proposé d'analyser.

Pour cela nous essaierons d'aborder deux alternatives théoriques: celle qui part de la nécessité d'accepter l'existence d'une série de restrictions innées avec lesquelles l'enfant est équipé "ab initio" pour faire face aux processus de classification, -qui est un des cadres naturels d'utilisation des catégories- sans laquelle il serait impossible de limiter ou borner les différentes sortes d'hypothèse sur le monde; et celle qui part d'une détection "neutre", non-dirigée, des régularités, similitudes et différences que l'environnement offre à l'enfant.

En d'autres mots nous situerons le problème dans le cadre des deux alternatives suivantes: restrictions innées et de développement, face au rôle de l'expérience et de la connaissance.

Le fait de travailler avec des tâches de classification est dû à ce que certaines mises au point traditionnelles dans cette sorte de besogne, répandues par Piaget et Vigotsky plus particulièrement, n'accordaient à l'enfant du préscolaire aucune compétence classificatoire. Cette constatation a été défiée dans les travaux actuels, qui accordent à l'enfant une compétence du moins partielle dans les tâches de classification et de catégorisation, non seulement en ce qui concerne les catégories de niveau élémentaire, comme quelques travaux dérivés de suppositions théoriques de Rosch le démontrent, mais jusqu'aux catégories de niveau supraordonné. (Smith, Sera et Gattuso, 1988)

D'autre part les travaux de Chi ont démontré que c'est principalement le niveau d'expertise que possède le sujet dans un domaine déterminé (c'est à dire la meilleure connaissance d'une maîtrise, y compris non seulement la quantité de connaissances mais aussi le degré d'organisation de ces derniers), qui détermine la compétence -plus ou moins grande- dans l'exécution de tâches cognitives définies. Cela nous mène à constater qu'une série de changements des processus de la pensée sont causés non pas tant par l'âge que par la connaissance (age related versus knowledge related). Cependant, cela veut-il dire qu'il ne faut pas compter sur les facteurs préprogrammés biologiquement?

#### I- REFLEXIONS A PARTIR DES DONNEES OBTENUES PAR DES TÂCHES DE CLASSIFICATION DES ENFANTS AVEUGLES DE NAISSANCE.

En premier lieu, on analyse pourquoi le sujet aveugle-né offre la possibilité d'une expérimentation naturelle pour nous suggérer des hypothèses et des explications dans ce domaine. Alors s'explique la commodité de contraster les données avec celles provenant des enfants voyants. On décrit alors, les types de témoignages des sujets, les catégories employées et les sortes de tâches.

On analyse les résultats en fonction de ceux que l'on a obtenu dans les propres tâches de classification, en même temps que les résultats des explications verbales que l'on sollicite aux sujets une fois la tâche terminée. Tout cela afin de nous permettre d'analyser les critères ainsi que les hypothétiques mécanismes ou stratégies qu'ils ont adopté.

Dans une première caractérisation du processus, en ce qui concerne le témoignage des enfants aveugles, on peut décrire deux étapes ou phases et

trois sortes de stratégies:

1<sup>re</sup> phase. Détection à travers le touché, d'une série de traits communs fondés sur la similitude des formes, car les dimensions de son organisation sont la mollesse face à la dureté, la flexibilité face à la rigidité, les protubérences que présentent les objets face aux parties arrondies, et surtout, les différentes parties qui constituent les objets.

En second lieu apparaît la similitude olfactive. Dans ce dernier cas les dimensions de l'organisation explicitées par les sujets sont plus pauvres, puisqu'elles se limitent à relever la présence/absence des bonnes odeurs, présents seulement dans le cas de la catégorie des plantes.

2<sup>de</sup> phase. Intégration en unités conceptuelles, à travers les étiquettes linguistiques, de l'information antérieure, à partir d'un processus d'interprétation.

Ce processus-là, évidemment postérieur à l'intégration des données provenant des différentes modalités sensorielles, pourrait être considéré comme dirigé par les "théories" -dans notre cas, théories sur les animaux, les plantes, les véhicules, etc.- c'est à dire, que l'on pourrait considérer que ce sont celles-ci qui dirigent le processus de recherche et de détection des traits perceptuels.

Etant donné que les enfants aveugles d'âge inférieur à notre témoignage, 6-7 ans, manifestent le besoin d'identifier et dénommer en premier, les objets avant de les classer, ce qui avait tendance à disparaître chez les enfants d'âge supérieur, ce fait-là, pourrait bien indiquer la nécessité de coller des étiquettes lexiques pour la classification.

De l'analyse de la phase de verbalisation ou explicitation des critères que les sujets ont adoptés hypothétiquement dans la tâche de classification, on peut décrire plusieurs sortes de stratégies. En premier lieu celle des sujets qui ont de grandes difficultés pour cette verbalisation-là, notamment parce que le processus a été automatique et donc non-conscient. De ce fait, malgré la classification correcte, ils ont recours à des arguments de type spatial ("les animaux se trouvent à gauche, les plantes à droite, les véhicules devant", etc.) ou de type de connaissance et expérience antérieure; "je le sais par coeur, j'en ai vu beaucoup, ils sont tout-à-fait différents", etc.

Une autre série de sujets énoncent explicitement la forme globale, comme une règle directrice de la classification, ce qui nous fait penser à une procédure de type holistique, globale, basée sur la similitude familiale. Un troisième groupe fait allusion à des parties déterminées, saillantes perceptuellement: pattes, tête, queue, pour les animaux; feuilles, pour les plantes; roues et portes pour les véhicules, ce qui nous fait penser à une procédure de type analytique.

Tversky (1990) fait allusion aux partonomies et aux taxonomies comme à deux façons générales d'organiser et procéder la connaissance selon la priorité que l'on donne aux parties des objets - ou à d'autres sortes d'entités- ou bien aux types ou classes. De la première façon, il en ressort la subdivision de la connaissance divisée en parties alors que de la seconde il en ressort une subdivision en classes. Les parties constituent des éléments naturels dans la perception et dans les réponses conductrices et de là sa relevance dans l'organisation de la connaissance. Cela constitue un squelette conceptuel qui relie la forme -les apparences- et la fonction des objets avec le langage. On peut alors parler d'une "bonté" (goodness) des parties, ce qui fait allusion à ce que les parties saillantes sont plus significatives ou relevantes, fonctionnellement et perceptuellement, pour le sujet. L'accusation des catégories des objets à travers des stratégies basées sur les partonomies implique une attitude analytique, top-down, face à celle

synthétique, bottom-up, qui se baserait sur des taxonomies. (Voir aussi Tversky et Hemenway, 1984).

## II-REFLEXIONS A PARTIR DES RESULTATS OBTENUS DANS UNE TÂCHE DE CLASSIFICATION DES ENONCES LINGUISTIQUES.

L'objectif de ce travail consistait en une analyse d'un type d'aggrégement d'une part, et de l'autre des critères ou arguments verbaux avec lesquels deux témoignages de sujets justifiaient son actuation dans une tâche de classification réalisée à partir d'une série d'énoncés linguistiques, très similaire du point de vue de sa structure synthétique superficielle, mais différents quant aux relations sémantiques subjacentes.

Il était question de décrire à quelle sorte de représentation et/ou connaissance de ces groupes de sujets -qui différaient au niveau de l'expérience par rapport au degrés d'instruction en syntaxe élémentaire de la langue espagnole-faisaient allusion pour pouvoir mener à terme cette tâche de classification.

On est donc partis de sujets experts et naïfs, en fonction du type d'entraînement linguistique antérieur. On a subdivisé en même temps chacun de ces groupes en deux autres en fonction de l'âge, 11 et 12 ans respectivement, correspondant à deux niveaux éducatifs différents, sixième et cinquième de collège, mais soumis à de mêmes processus d'instruction. La finalité était de vérifier s'il existait des différences en fonction du degrés d'instruction et du développement évolutif.

L'analyse typologique descriptive des critères adoptés pour chacun des groupes, afin de justifier la tâche de classification a donné le résultat suivant:

A. Les sujets naïfs et leur habileté linguistique pour réaliser des analyses synthétiques. Etant donnée leur manque d'instruction, et donc de l'absence d'outil grammaticaux conceptuels nécessaire -ils organisèrent leurs réponses en relation avec les différentes sortes de similitudes que l'on explique par la suite:

1. Critères basés sur une similitude diffuse et globale des phrases entre elles, sans spécifier aucun de leurs critères et sans le rapporter à aucun élément en concret. Cette stratégie de réponse est adopté par 29% des enfants de sixième et par 31% de ceux de cinquième. (SEMDIF)

2. Critères basés sur une similitude globale qui se rapporte à des contextes définis d'intérêts, de valeurs, ou de connaissance des situations plus ou moins spécifiques. Ce sont des critères qui se rapportent à une information contextuelle ou pragmatique. 41% des plus petits ont recours à ce type d'information, alors que seulement 3% des plus âgés le font. (SEMCONTX)

3. Critères basés sur une similitude qui se rapporte à des valorisations ou évaluations très génériques des situations, qui font évidemment référence au texte, autour de deux poles de la dimension bonté/méchanceté, 6% et 3% respectivement, dans les deux groupes d'âge. (SEMVAL)

4. Basés sur une similitude linguistique à partir de l'information d'approvisionnement par le signifié lexical, et qui fait généralement allusion aux actions des verbes. Cette stratégie est suivie par 17% des sixièmes face aux 45% des cinquièmes. (SEMLEX)

5. Basés sur une similitude d'éléments prosodiques, métriques et de versification, sans analyser ni spécifier, 6% des enfants de sixième, ce qui correspond à un seul enfant. (SEMPROS)

6. Qui se rapporte à des similitudes de type morphologique, puisqu'ils font allusion explicitement à des articles et désinences des verbes, 7% des enfants d'âge supérieur. (SEMMORF)

On peut établir un "continuum" dans une échelle hypothétique de similitudes en vertu du type de représentation et de stratégies auxquelles ils ont recours pour réaliser la classification des niveaux évolutifs qu'adopte chacune des stratégies.

En absence de connaissances syntactique, ils ont recours à la connaissance basée sur des similitudes de type "signifié lexical", qui serait une stratégie plus mûre, -de type linguistique- 45% des sujets d'âge supérieur, face à 17% d'âge inférieur. Au contraire 41% des enfants d'âge inférieur ont recours à une information contextuelle ou de type pragmatique face au 3% d'âge supérieur.

B. De leurs côtés, les sujets experts, qui avaient été instruit antérieurement de manière systématique dans la réalisation d'une analyse syntactique de phrases simples, et donc, qui possédaient un treillis conceptuel élémentaire, organisèrent leurs réponses en accord avec les critères très différentes, de ceux de l'autre groupe, même s'il y eut un nombre élevé de sujets, surtout entre les plus petits, qui n'ont pas su ou n'ont pas pu justifier la tâche de classification qu'ils avaient antérieurement réalisé.

Dans le groupe de sixième, ceux d'âge inférieur, seulement 23% des enfants exposèrent les critères de classification des deux groupes d'énoncés. 29% exposèrent seulement celui des groupes formés et 47% ne purent ou ne surent donner aucune explication. Au contraire entre les élèves de cinquième, 81% justifiaient les deux arguments face aux 11% qui en justifiaient un seul, et 7% qui ne donnaient aucun critère.

L'analyse typologique descriptive révéla la chose suivante:

#### 1. Les sixièmes:

L'analyse typologique des critères de classification donnés par les plus petits -sixième- a été la suivante:

Des 29% qui ont donné un seul critère, celui-ci fut évalué comme "morphologique" dans 40% des cas; "syntactique superficiel" dans 20% des cas et de "signifié lexical" dans 40% des cas. Des 23% des sujets de ce niveau qui ont répondu aux critères de formation des deux groupes, 37,5% furent évalués comme de type de "signifié lexical" et un 62,5% de type "syntactique superficiel". (Aucun des critères n'a été de type morphologique). (Voir graphiques 2 et 3).

Tous les critères d'évaluation de sixième c'est à dire 100%, ont été considérés "simples", c'est à dire qu'ils impliquent seulement un type de catégorie évaluative, alors que ceux proportionnés par les cinquièmes étaient simples avec 77,27% et "mixtes" ou "complexes" avec 22,7%.

#### 2. Les cinquièmes:

81% des sujets qui ont répondu en justifiant les deux groupes qu'ils avaient formé mais avec des critères "simples", 2,2% a répondu par des critères évalués en tant que "morphologiques", 45% "syntactiques superficiels", 22,7% par un critère de type "signifié lexical", 6,8% de type "sémantique conceptuel profond". (Voir le graphique 4).

Ces quatre groupes correspondent aux critères simples, les pourcentages des réponses aux "mixtes" furent 6,8% critère "lexical et syntactique superficiel"

2,2% "morphologique/lexical et sémantique conceptuel", 2,2% syntactique superficiel et sémantique et, finalement 4,5% "morphologique/lexical". (Voir graphique 4 et 5).

## REFLEXIONS ET COMMENTAIRES FINAUX

Etant donné que les dimensions d'analyse seraient multiples en fonction desquelles on pourrait interpréter et valoriser les données sommairement présentés dans les deux travaux empiriques cités plus haut, -caractéristiques différentielles des deux types de maîtrises conceptuelles impliqués dans chacune des deux tâches, différents statuts épistémologique des unités, différences individuelles dans l'exécution et verbalisation de la tâche, différences en fonction de l'âge, experts face aux naïfs, etc.- on a décidé de se centrer principalement dans ce commentaire final, sur divers aspect des types de verbalisations avec lesquels les sujets justifient chacune des deux tâches de classification sur lesquelles on a travaillé, avec le but d'induire le type de connaissance et représentations qui ressortent de ces verbalisations-là.

Pour cela nous mettrons en relief les caractéristiques les plus générales et les plus stables.

1<sup>o</sup> Il y a assez de difficulté pour expliquer à travers la verbalisation de la tâche réalisée, c'est à dire du savoir-faire. Tous les sujets, aussi bien dans la tâche de classification des objets comme d'énoncés linguistiques, savent réaliser la tâche, mais beaucoup moins savent la justifier. L'influence du facteur âge paraît être éminent dans cette capacité de verbalisation. Le facteur expérience incise plus dans le type de verbalisation que dans la présence ou absence des mêmes.

2<sup>o</sup> Dans les sujets qu'ils verbalisent il ya différents degrés de précision et de clareté dans ses expressions linguistiques. De nouveau le facteur âge uni au niveau d'expertise déterminent le niveau d'habileté linguistique.

3<sup>o</sup> On peut décrire un système de catégorisation des types de sujets en fonction du type de verbalisation produite, qui, bien sûr, permettrait de décrire les différents types de stratégies adoptés dans la résolution de la tâche et le type de représentations mentales/connaissance à laquelle ils ont recours.

Dans ce sens les stratégies moins mûres sont celles qui se posent exclusivement sur des caractéristiques superficielles basées sur la similitude perceptive, qui fait ou non allusion à quelque chose en concret -qu'il soit bien du type de croyances ou de contexte- à la suite, se placeraient les stratégies basés sur des critères simples ou des règles simples de type linguistique, règles morphologiques, de signifié lexical, syntactiques, etc., finalement celles basées sur des critères ou structures complexes dans lesquelles il y a connaissance de différents types pragmatique, syntactique, etc.

## REFERENCES

Carey,S. 1985. Conceptual change in childhood., Cambridge, MA;MIT, Press.

Carey, S; 1991. Knowledge acquisition: enrichment or conceptual change? in Carey,S. and Gelman, R. "The epigenesis of mind; Essays on biology and cognition." LEA.

Dubois,D. 1991. Sémantique et cognition. Catégories, prototypes, typicalité. Editions du CNRS.

Keil,F. 1991. The emergence of theoretical beliefs as constraints on concepts, in Carey,S. and Gelman,R. (eds.) "The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition". LEA.

Markman,E. 1989. Categorization and naming in children. Problems of induction. The MIT Press.

Murphy,G.L. y Medin,D.L. 1985. The role of theories in conceptual coherence. Psychological Review 92, 289-316.

Tversky,B. 1990. Where partonomies and taxonomies meet. In Savas. L. Tsohatzidis (Ed.) "Meanings and Prototypes". Routledge , N.Y.

Tversky,B. y Hemenway,K. 1984. Objects, parts and categories. Journal of Experimental Psychology: General, 113, 169-93.

**VAARAP,**  
**un système de Validation et Apprentissage Autoadaptatif**  
**pour**  
**la Reconnaissance Automatique de la Parole**

par

**A. Andreewsky, M. Desi, C. Parisse**

### **1. Objectif du système VAARAP**

Le système VAARAP (Validation et Apprentissage AutoAdaptatif pour la Reconnaissance Automatique de la Parole) a pour but de reconnaître la parole continue.

Tous les éléments du système VAARAP utilisent des techniques d'apprentissage.

On montrera ci-dessous que non seulement les données phonétiques et linguistiques, mais également les paramètres qui définissent les algorithmes du système peuvent évoluer au cours du temps.

Dans VAARAP, à partir d'un ensemble d'énoncés prononcés par un locuteur donné, on obtient par apprentissage les références acoustiques les plus caractéristiques des dits énoncés, et ensuite, en phase de reconnaissance, on utilise ces références pour obtenir une représentation phonétique de n'importe quelle phrase prononcée par le même locuteur. Un module linguistique prend alors en charge la suite des candidats phonétiques qu'il transforme en une suite lexicale syntaxiquement correcte.

### **2. Présentation du système**

#### **2.1 Saisie des données**

On enregistre du signal de parole, échantillonné à 10 khz et qui correspond à un corpus d'énoncés phonétisés, prononcés distinctement et d'une façon continue, par un locuteur donné. Pour être complet et représentatif de la phonétique du français, on est conduit à enregistrer environ un millier de chaînes de structure phonétique différente qui, pour l'ensemble, correspondent à peu près à trente minutes de parole.

#### **2.2 Traitement du signal**

Dans VAARAP le traitement du signal repose sur l'emploi d'une transformée de Fourier discrète qui dans une fenêtre temporelle de largeur paramétrisée  $L$ , va mettre en évidence les fréquences et amplitudes correspondantes dans ladite fenêtre. Ensuite afin d'analyser tout le signal, on doit déplacer la fenêtre temporelle suivant un certain pas  $P$ . Si l'on veut détecter les événements acoustiques ayant un caractère phonétique, le pas  $P$  doit être assez petit. Une fois effectuée la transformée de Fourier, des moyennes  $N$  par  $N$ , sur les amplitudes des fréquences

voisines, sont calculées. Les valeurs des trois paramètres, L, P, et N, sont optimisées, d'une part en rétroaction avec la qualité de la reconnaissance en régime autocohérent, et d'autre part en faisant intervenir des considérations physiologiques: perception auditive minimale pour le paramètre L, et concernant le paramètre N, non discernabilité, dans la tâche effectuée, des fréquences de valeurs trop proches.

Une fois effectué la transformée de Fourier de X échantillons dans une fenêtre L, puis la moyenne N par N, on obtient X/N nombres que l'on appelle spectre du signal de largeur L. Si par exemple X = 512 et N = 32 alors X/N = 16 et le spectre est constitué de 16 valeurs.

### **2. 3 Etiquetage automatique et dictionnaire de références phonétiques.**

L'étiquetage automatique a pour but de constituer un dictionnaire de références phonétiques, c'est à dire de spectres auxquels on a attribué une étiquette phonétique.

Pour cela on a donné au système un algorithme de règles permettant de segmenter le signal en syllabes et d'affecter des étiquettes phonétiques à ces segments. Cet algorithme suppose connu la structure phonétique de l'énoncé prononcé, ce qui est normal puisqu'on se trouve en phase d'apprentissage.

Notons que dans l'algorithme d'étiquetage automatique, l'étude des contrastes d'énergie acoustique caractéristiques des transitions intra-phonétiques joue un rôle important.

### **2. 4 Autocohérence et simulation de la reconnaissance.**

Dans tout ce qui suit on est amené à comparer les références entre elles au sens d'une certaine distance, définie comme suit :

Si  $a(1), \dots, a(i), \dots, a(x)$  sont les x valeurs d'un spectre a

Si  $b(1), \dots, b(i), \dots, b(x)$  sont les x valeurs d'un spectre b

Alors  $d(a, b) = \sup (i) | a(i) - b(i) |$

Lorsque b parcourt toutes les références du dictionnaire la meilleure référence est donnée par la plus petite valeur de  $d(a, b)$ . Outre la référence la plus proche d'une référence donnée "a", on peut associer à "a", un certain nombre donné T de références rangées par ordre décroissant de proximité. Le nombre T est appelé profondeur du treillis. On peut alors effectuer des scrutins qui prennent en compte le nombre de références favorables à la référence à reconnaître, ainsi que les distances qui leur sont attribuées. La profondeur T du treillis constitue un paramètre optimisable, puisque selon la valeur de T on modifie la qualité de la reconnaissance. D'autre part on peut encore faire un bilan de scrutin en totalisant les références favorables à une référence donnée dans plusieurs treillis consécutifs. On introduit ainsi un nouveau paramètre S qui est égal au nombre de treillis successifs sur lesquels se fait le bilan phonétique.

Une première version du dictionnaire des références phonétiques étant constitué, on va éliminer de ce dictionnaire les références non reconnues par autocohérence, étant entendu que dans un segment phonétique donné, aucune référence de ce segment ne participe à sa propre reconnaissance.

L'aptitude à reconnaître des références ainsi sélectionnées est testée sur tout le corpus d'apprentissage. Comme aucune référence ne participe à sa propre reconnaissance, c'est bien une véritable reconnaissance phonétique qui est ainsi effectuée, et la connaissance des

étiquettes du corpus ne sert qu'à calculer d'une manière automatique des statistiques qui fournissent une évaluation chiffrée (en pourcentages) de la qualité des résultats obtenus.

## **2. 5 Optimisation automatique des paramètres du système.**

Les paramètres L, P, N, T, et S définis plus haut, vont être ajustés et optimisés. Dans une première étape les paramètres modifiés sont la largeur de la fenêtre L, le pas de déplacement P et le nombre N relatif à la moyenne. L devient progressivement de plus en plus large et P de plus en plus fin. Puis on modifie la profondeur T du treillis qui devient de plus en plus court, le nombre S de treillis successifs totalisés devenant de plus en plus long.

A chaque fois qu'un paramètre est modifié on recommence toute la procédure de reconnaissance autocohérente. En principe la qualité de l'optimisation ne dépend pas de l'ordre dans lequel on choisit les paramètres pour les modifier, mais toute la combinatoire relative à ce problème n'a pas été testée.

## **2. 6 Reconnaissance phonétique de phrases qui ne font pas partie du corpus d'apprentissage.**

Pour la reconnaissance, on utilise les mêmes procédures que celles décrites en 2. 4, c'est à dire :

. Le signal relatif à un énoncé donné, est analysé par une transformée de Fourier en tenant compte des paramètres L, P, N, optimisés au cours de la phase d'apprentissage (2. 5).

. On obtient alors une suite de treillis de profondeur T, et on fait sur ces treillis des bilans S par S, treillis après treillis, jusqu'à la fin de l'énoncé.

. Le résultat de ces deux opérations se présente sous la forme d'une chaîne phonétique entachée d'erreurs, avec des ajouts des élisions et des substitutions.

## **2. 7 Programmation dynamique et algorithmes lexicaux syntaxiques.**

A partir de la chaîne phonétique entachée d'erreurs, on recherche dans un dictionnaires des chaînes phonétiques candidates. Pour cela, on utilise un algorithme de programmation dynamique qui ordonne les chaînes candidates par ordre de proximité phonétique avec la chaîne phonétique entachée d'erreurs. Cet algorithme utilise un lexique de plusieurs milliers de mots et formes phonétiques associées. Une vérification syntaxique est effectuée, complétée éventuellement par une intervention manuelle interactive. L'analyseur syntaxique est du type markovien à apprentissage. Précisons encore que lorsqu'un mot ne se trouve pas dans le lexique grammaticalisé, il ne peut être reconnu par le système.

### **3. L'apprentissage dans VAARAP**

Dans le système VAARAP on peut distinguer plusieurs types d'apprentissages différents :

#### **3. 1 apprentissage du type cumul des données :**

- 3. 11 signal et énoncés phonétisés correspondants.
- 3. 12 dictionnaire lexical grammaticalisé
- 3. 13 textes d'apprentissage, permettant d'obtenir une syntaxe positionnelle inférente.

#### **3. 2 apprentissage du type "donnée d'algorithmes" :**

- 3. 21 algorithme de constitution d'un ensemble de spectres à partir du signal.
- 3. 22 algorithme d'étiquetage automatique
- 3. 23 algorithme de comparaison et évaluation de distances entre spectres et références phonétiques.
- 3. 24 algorithme d'identification phonétique par scrutins sur les treillis.
- 3. 25 algorithmes de programmation dynamique.
- 3. 26 algorithmes d'obtention de règles syntaxiques à partir des textes d'apprentissage.

#### **3. 3 apprentissage du type transformation et optimisation des données.**

3. 31 l'algorithme 3. 22 opère sur les données 3. 11, ce qui permet d'obtenir un premier dictionnaire de références phonétiques.

3. 32 l'algorithme 3. 26 opère sur les données 3. 13, ce qui permet d'obtenir un ensemble de règles syntaxiques positionnelles et fréquentielles.

3. 33 une combinaison des algorithmes 3. 23 et 3. 24 opérant sur le dictionnaire 3. 31 permet d'obtenir des références optimisées.

#### **3. 4 apprentissage par le résultat obtenu.**

Autodéfinition des valeurs des valeurs paramétriques (L, P, N, T, S) permettant d'optimiser les performances.

#### **3. 5 apprentissage par interaction avec le milieu extérieur.**

Au niveau 2. 7, il y a validation d'une phrase correcte, réinjection en 2. 1, et réapprentissage complet.

### **Conclusion**

On a pu constater que le système artificiel VAARAP, comme le système humain et bien d'autres systèmes, effectue :

- . des apprentissages de natures différentes
- . des interactions entre les différents types d'apprentissage
- . une interaction avec le milieu extérieur au système et modification de son état interne en vue d'une amélioration de sa performance.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDREEWSKY A. et FLUHR C.  
Apprentissage - Analyse automatique du langage -  
Application à la documentation.  
*Documents de linguistique quantitative*, N° 21  
Editions Dunod, 1973
- ANDREEWSKY A., DESI M., FLUHR C., POIRIER F.  
Une méthode de mise en correspondance d'une chaîne  
phonétique et de sa forme acoustique.  
*11e Congrès International d'Acoustique. Toulouse*,  
15-16 juillet 1983
- ANDREEWSKY A., ANDREEWSKY M., PARISSÉ C., RINGOT P.  
Un système d'apprentissage pour la création de relations lexicales-sémantiques.  
*AFCEt, Congrès Européen de Systémique*, Tome 1, Oct. 1989, 33-39.
- DESI M., RINGOT P., ANDREEWSKY A.  
Etiquetage automatique du signal de parole continue à  
l'aide de la variation relative d'énergie des phonèmes.  
*XIth Internat. Congress of Phonetic Sciences*.  
Tallin, August 1-7, 1987
- MARIANI J.  
ESOPÉ : un système de compréhension de la parole  
continue. *Thèse d'Etat*, Université de Paris VI,  
9 juillet 1982
- MARIANI J.  
Méthodes en reconnaissance phonétique,  
*11° Congrès International d'Acoustique. Toulouse*,  
125-137, 1983
- MERCIER G., GERARD M., GILLET D., NOUHEN-BELLE C. A., QUINTON P.,  
SIROUX J.  
Le système de reconnaissance de la parole continue KEAL  
*12° JEP, GALF*, Montréal, 1981
- MERCIER G.  
Analyse acoustique et phonétique dans le système KEAL  
*12° JEP, GALF*, Montréal, 1981
- PARISSÉ C., ANDREEWSKY A., IMADACHE A.  
Un système d'apprentissage de relations lexico-sémantiques pour la  
reconnaissance de l'écriture manuscrite. *AFCEt/Interface*, Dec. 1989, 9-12.

UNE ARCHITECTURE POUR LA DETECTION DE PROXIMITE  
DANS UN FICHER DE TOXICOVIGILANCE INDUSTRIELLE

- Mariarosa CONSOLA RIZZO, GNOSIS - 2, Rue des Sablons  
78400 - CHATOU - Tel. (1) 39 52 79 81
- C. MEYER-BISCH, INRS - BP 27 - 54501 VANDOEUVRE
- M. FALCY, INRS - 30, Rue Olivier Noyer - 75680 PARIS Cedex 14

RESUME : Il s'agit d'un système d'extraction des connaissances, sous forme de critères de ressemblance, évaluation de proximité, et/ou calcul de distances à partir d'un ensemble d'observations d'incidents (cas) stockés dans le système de vigilance industrielle de l'Institut National de Recherche et de Sécurité. La base des cas est constituée, entre autres, d'un vecteur d'entrée, qui représente des nuisances codées (facteurs de risques et facteurs subjectifs de relation risques/symptômes) et d'un vecteur de sortie qui représente des symptômes codés. L'architecture BAM ( Bidirectional Associative Memory ) du réseau utilisé pendant le maquettage et le prototypage, ont démontré la faisabilité et l'intérêt de cette solution. En effet, le réseau mémorise chaque cas comme une "association" entre les entrées ( nuisances ou expositions ) et les sorties ( symptômes ). Lors de l'exploitation, il recherche, parmi les cas qu'il a appris, les associations les plus proches de celle qu'on lui soumet jusqu'à parvenir au minimum local.

MOTS CLES : Toxicovigilance - Recherche de proximité - Expositions - Symptômes  
- Architecture BAM - Surface d'énergie

ABSTRACT : With regard to extract the knowledges from the set of records stored in the medical toxicovigilance data base of the INRS, (French National Institute for Research and Safety), we were looking for an automatic system able to find similarities between records. It's a matter of similarity criteria, closeness evaluation and/or distance valuation. The data base contains, among other items, an "Entry vector" that represents the coded "exposures", including relationship factors, and an "Output vector" that represents the coded "symptoms".

The BAM (Bi-directional Associative Memory) network paradigm has shown the best performance during the tests about some records. Indeed, the network learns each pair of vectors as an "Association" between the "exposures" (Inputs) and the "symptoms" (output). For a shown Association, the network recall procedure tries to find among all the learned Associations, the closest learned Association, i.e. the local minimum of the agregate weight matrix. The "similarity" between the two pairs of Associations is immediately found.

KEYWORDS : Toxicovigilance - Closeness evaluation - Exposures - Symptoms -  
BAM network paradigm - Energy fonction

## 1. LA TOXICOVIGILANCE MEDICALE

---

La Toxicovigilance est une action qui vise à recueillir, de façon systématique, des informations sur les incidents et accidents pouvant être liés à l'emploi de produits toxiques non-médicamenteux. Ceci afin de dévoiler au plus tôt, soit une nouvelle pathologie liée à l'emploi d'une substance connue, soit une pathologie survenant avec une substance nouvelle ou un procédé technologique nouveau.

### Exemples :

- a. La détection des premiers angio-sarcomes hépatiques dus au chlorure de vinyle en 1974, chez trois employées d'une même entreprise
- b. La détection d'une pathologie inhabituelle en Espagne due à l'ingestion d'huiles "frelatées".

Cette définition peut s'appliquer à l'ensemble des nuisances rencontrées en milieu de travail ( chimiques, physiques biologiques,...) qui constitue un terrain propice à une action de vigilance, d'autant que l'association nuisances - pathologie est constamment recherchée par la médecine du travail.

La toxicovigilance a donc pour but d'optimiser le recueil des informations et d'en assurer un traitement rapide afin de dévoiler au plus tôt, soit une nouvelle pathologie liée à l'emploi d'une substance connue, soit une pathologie survenant avec une substance nouvelle ou un procédé technologique nouveau. En effet, dans un système de vigilance, c'est la confrontation d'observations similaires qui permet de suspecter la cause réelle de l'affection constatée.

On recherche donc un système informatique "intelligent", capable de reconnaître deux cas "semblables" décrits de façon légèrement différente, tant en ce qui concerne les symptômes que les expositions. Cette recherche de proximité permettra de faire émerger très rapidement des phénomènes pathologiques concordants qui devront ensuite faire l'objet d'études toxicologiques ou épidémiologiques ultérieures.

## 2. UNE SOLUTION AVEC L'ARCHITECTURE BAM DES RESEAUX NEURONAUX

---

### 2.1. LES TECHNIQUES CLASSIQUES

Pour résoudre le problème posé par la recherche de proximité on a d'abord exploré des techniques classiques telles que :

- a. La représentation par graphes arborescents,
- b. L'étude des cas basée sur la théorie des ensembles flous,
- c. Le calcul statistique de proximité.

Dans la première, la combinatoire devient rapidement explosive : à chaque noeud un symptôme, chaque symptôme appartenant à plusieurs arbres et un millier de symptômes à prévoir.

Concernant la deuxième, les difficultés de conception et la mise en oeuvre informatique trop importantes nous ont poussé à abandonner cette solution.

Dans la troisième, le calcul statistique du plus petit voisin satisfait la proximité "statistique", mais ignore la notion de "voisinage", pourtant fondamentale dans la codification SNOMED des symptômes. Cette codification est une nomenclature systématisée, multi-axiale des termes usuels en médecine, organisée hiérarchiquement (de préférence). L'un des axes est la "Topographie" ou anatomie.

La technologie des réseaux neuronaux a donc été choisie comme dernier recours. Le projet d'étude de faisabilité nous a conduit à tester et comparer différentes architectures et à analyser les solutions les plus appropriées à notre application.

## 2.2. LES CONTRAINTES POUR UNE ARCHITECTURE NEURONALE

Rapidement nous avons dû faire face à des contraintes assez rigides, à savoir :

### a. Apprentissage non supervisé

Il n'y a pas un "cas" meilleur qu'un autre ou un ensemble de symptômes "modèle" en relation à un ensemble d'expositions. Donc le réseau doit s'auto-organiser au moment de l'apprentissage.

### b. Mémoire hétéro-associative

Les données d'entrée (les expositions), sont différentes des données de sortie (les symptômes).

### c. Etats non orthogonaux

Dans les matrices de données entrées-sorties, l'information codifiée et effectivement présente couvre aproximativement vingt pour cent de l'information possible. En autre termes, les valeurs "vides" ou nulles sont prédominantes.

### d. Classification par voisinage et non par classes rigides

A cause de la structure hiérarchique de la codification adoptée SNOMED, l'information topologique contenue dans la racines des codes ne doit pas être perdue. Mieux, il faut que le système soit capable de l'exploiter : notion topologique de voisinage.

Après différents essais avec les "cartes" de Kohonen, la "Mémoire de Kanerva", le modèle de Hopfield, nous nous sommes orientés vers le modèle ART (Théorie de la Résonance Adaptative) de Grossberg.  
Enfin, l'architecture BAM ( Bi-directional Associative Memory ) nous a donné les meilleurs résultats.

### 2.3. RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DU RESEAU BAM

Inspiré de la Théorie de la Résonance Adaptative de Grossberg, l'architecture BAM a été développée par BART KOSKO à Verac Corporation (USA) en 1987, pour les ordinateurs optiques. Il s'agit d'une généralisation du modèle de Hopfield, pour construire une mémoire hétéro-associative.

C'est une architecture à quatre couches :

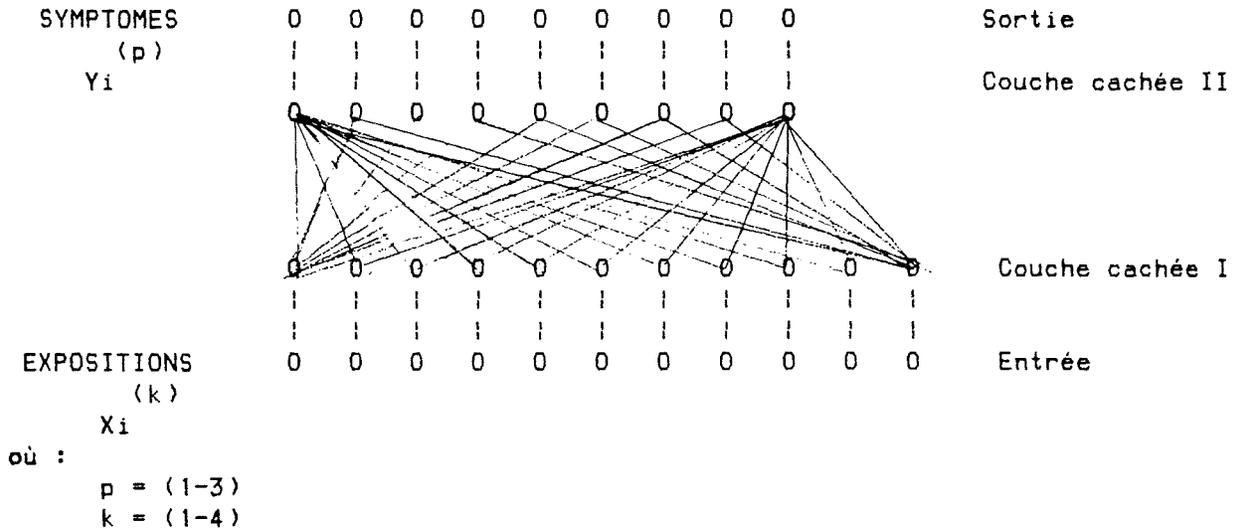
- a. La couche d'entrée ( input ) fonctionne comme un buffer pour les données d'entrée.
- b. La deuxième couche contient le même nombre de cellules que la première et la connexion entre les deux couches s'effectue élément par élément. C'est à dire, chaque élément de la première est connecté à son correspondant de la deuxième. Chaque connexion est affectée d'un poids fixe.
- c. La troisième couche est totalement connectée à la deuxième et vice-versa. Celles-ci sont les couches qui "apprennent".
- d. Chaque élément de la troisième couche est également connecté à son correspondant de la couche de sortie ( output ). Chaque connexion est affectée d'un poids fixe.

### 2.4. FONCTIONNEMENT ET PARAMETRES UTILISES

Chaque cas traité en toxicovigilance médicale est constitué d'une association d'"expositions" et de "symptômes" liés entre eux par un facteur de relation. Ce facteur représente l'"indice de robustesse" de cette relation.  
Pour une association 'i' donnée, l'ensemble des expositions correspond au vecteur d'entrée au réseau 'Xi' et l'ensemble des symptômes correspond au vecteur de sortie 'Yi'. Le cas 'i' est donc caractérisé par le couple de vecteurs ( Xi , Yi ).

## 2.4.1. PLAN D'APPRENTISSAGE

Pour chaque cas, le vecteur des expositions est présenté à la couche d'entrée et le vecteur des symptômes associés est présenté à la couche de sortie, selon le schéma suivant :



L'ensemble des couples de vecteurs est présenté au réseau une seule fois. Pour simuler le facteur de relation, l'apprentissage a été renforcé en proportion à l'intensité exprimée par ce facteur. Exemple, pour une association  $i$ , si le facteur de relation est "5", cette relation a été présentée au réseau 5 fois.

La règle d'apprentissage appliquée aux deux couches intermédiaires est la version bipolaire de la règle de Hopfield. (Si la sortie désirée et l'entrée ont toutes les deux la valeur "1" ou "-1", le poids est augmenté. Si les deux ont la valeur "0", le poids existant reste inchangé. Dans les autres cas, le poids est diminué).

Le taux d'apprentissage est fixé à "1.0". Cependant, à cause du manque d'orthogonalité des exemples, des adaptations ont été introduites, visant à accentuer l'impact des valeurs positives et réduire les valeurs négatives.

La fonction de sommation est la somme classique des entrées effectives.

La fonction de transfert utilisée (spécifique à l'architecture BAM) est la suivante :

Si la somme est supérieure à zéro, la valeur pour le transfert est "1";  
 si elle est inférieure à zéro, la valeur est "-1";  
 sinon elle est nulle.

Au fur et à mesure que les cas sont présentés au réseau, le processus d'apprentissage crée une "surface d'énergie" dont le domaine est l'ensemble des couples  $(X, Y)$  appris.

#### 2.4.2. PLAN DE RAPPEL

La procédure de rappel met à jour par itérations successives l'état du réseau de manière à ce que son "énergie" diminue à chaque itération jusqu'au minimum local. Le but est la recherche de l'association ( ou des associations ) qui se rapproche le plus d'un couple de vecteurs donné ; la recherche donc des associations les plus "similaires".

Pour ce faire, on choisit un cas (nouveau ou appris) et on le présente au réseau : le vecteur des expositions à la couche d'entrée et le vecteur des symptômes à la troisième couche.

Il y a une "oscillation" en va-et-vient ou "réverbération" entre les deux couches intermédiaires, jusqu'à atteindre l'état d'équilibre.

La convergence à un état d'équilibre est garantie par l'intermédiaire d'une fonction d'énergie qui décroît à chaque itération du processus.

Le cas présenté est considéré comme un cas existant (appris) mais bruité; le système recherche donc le cas qui lui "ressemble" le plus : le minimum local pour ce cas.

En effet, pour un cas appris, le minimum local est lui même; les autres cas les plus proches du minimum local lui sont "similaires". Le but recherché dans cette application n'est donc pas l'obtention du minimum local, mais la recherche des autres cas les plus proches à ce minimum.

#### 2.4.3. LE FACTEUR D'ACTIVATION

Optionnellement on peut introduire une variante restrictive au plan de rappel :

- a. Un Facteur d'Activation (Firing Rate)
- b. Une variable aléatoire uniforme (vau) entre 1 et 100

Une cellule est modifiée si la somme des valeurs d'entrée est différente de 0 et si la variable aléatoire "vau" > facteur d'activation.

Un facteur "fort" est utilisé quand l'association de départ est complète mais bruitée, comme dans notre application.

Un facteur "faible" est utilisé quand l'association de départ est partielle, par exemple, connue seulement par la première couche BAM.

Nous avons analysé et testé plusieurs plans de rappel, soit au niveau du maquettage, soit au niveau du prototypage.

Au niveau du maquettage, le facteur de activation ( Firing rate ) assigné à chaque cellule ( c'est à dire son pourcentage de chance d'activation ) est ajusté à 10%, pour un maximum de 10 cycles d'oscillations par rappel.

Aucun facteur de modification de poids n'a été introduit. On a observé une bonne convergence : les associations proposées par le réseau comme proches du minimum local sont "similaires" à l'association présentée.

Par contre, quand le facteur de activation est fixé à 0.0, pour l'intervalle de cycles d'oscillation de 11 à 20, ce plan bloque pratiquement la recherche. Si les oscillations se prolongent au delà de 10 cycles, cela signifie que le cas présenté est très différent de tous les autres appris et donc il n'y a pas de cas "similaires".

Au niveau de l'exploitation avec 200 cas, on a remarqué qu'un facteur d'activation supérieur à 25 conduit le plus souvent à des résultats imprécis. Un facteur 10 ou 15 est source de résultats cohérents, mais pas très riches. Enfin, il existe des similitudes qui ne sont pas envisagées par le système ou bien elles sont détectées mais avec des facteurs élevés. Pour pouvoir appréhender tous les cas similaires à un cas proposé, il faut donc pratiquer avec deux facteurs d'activation, l'un faible (10 ou 15) et l'autre plus élevé (30 ou 35) et comparer ensuite les résultats.

En réalité, un facteur "faible" modélise de plus près l'activité a-synchrone du cerveau, mais conduit à une plus lente convergence.

#### REFERENCES

1. [Meyer] C.Meyer-Bisch, M.Falcy, M.Puzin, "Risques professionnels, soyons vigilants", Note ND-1501-117-84, INRS, Paris, 1984
2. [Meyer] C.Meyer-Bisch, M.Falcy, "Aspects conceptuels d'un programme automatique d'extraction de la connaissance du système de vigilance industrielle de l'INRS, N°.Etude B.2/3.1.02, INRS, Paris, 1989
3. [Kosko, B87a] Bart Kosko, "Constructing an Associative Memory", BYTE Magazine, Sept.1987
4. [Kosko, B87b] Kosko, Bart, "Bidirectional Associative Memories", IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1987
5. [Kosko, B87c] Kosko, Bart, "Adaptive Bidirectional Associative Memories" Applied Optics, 1987
6. [Grossberg] Grossberg, Stephen (ed.), The adaptive Brain, Volume I, North-Holland, 1986
7. [Jorgensen] Jorgensen, Chuck, Matheus, Chris, "Catching Knowledge on Neural Nets", AI Expert, Décembre 1986
8. [Hopfield JJ82] Hopfield, John J., "Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, Vol.79, pp 2554/2558, 1982
9. [NeuralWorks] NeuralWorks of Neural Ware, Inc., User's Guide, 1988

# **Organisations sociales et adaptation**

## **Proposition d'intervention aux Journées de ROCHEBRUNE**

I.A. et Cognition : Apprentissage, évolution, adaptation.

par Mme Schéhérazade ENRIOTTI

A.F.P.A. (Association pour la Formation Professionnelle des Adultes)

Direction de la Formation/ C.P.T.A. de Neuilly-sur-Marne/ U.M.T.E.

**titre : " Pourquoi un individu et une organisation sociale doivent-ils apprendre pour s'adapter au changement et évoluer. Quelles sont les conditions de cet apprentissage ?"**

Ma contribution reposera sur la double problématique individu-collectif suivante :

Partant du constat de la situation actuelle : monde qui se complexifie et en mouvance rapide et incertaine, les entreprises qui survivront seront celles qui auront su unir dans une même synergie communication, formation et des modes de conception, de production et de distribution souples.

Quand la complexité s'accroît, que l'interdépendance s'intensifie et que le changement s'accélère, la capacité à apprendre mieux et plus vite constitue le seul avantage concurrentiel durable pour l'individu comme pour une organisation.

Donc pour accompagner ce changement, nous examinerons quelles peuvent être les articulations entre la problématique du changement,  
l'(auto-) formation, la formation  
expérientielle au niveau individuel,  
et l'apprentissage organisationnel.

### En ce qui concerne l'apprentissage individuel :

Depuis quelques années, à l'A.F.P.A. nous travaillons sur un modèle de formation individualisée tirée vers l'autoformation. Pour ce faire nous avons été amenés, entre autres axes de travail, à rechercher des démarches, des outils ... qui pourraient nous éclairer sur les différentes façons d'apprendre afin que les situations de formation proposées soient plus adaptées aux apprenants qu'elles ne le sont actuellement. Après avoir recherché des éléments de solution dans les théories d'apprentissage, chez Piaget ... nous avons entamé avec des formateurs et des chercheurs en pédagogie d'adultes travaillant dans la perspective de l'auto-formation une réflexion sur nos propres démarches d'apprentissage en situation de formation et en situation de production telles qu'elles nous apparaissent rétrospectivement.

Nos hypothèses actuelles sont les suivantes :

\* c'est en réfléchissant de manière critique à notre façon d'apprendre que l'on apprend à apprendre,

\* l'apprentissage doit être abordé globalement à travers la personne dans son intégralité.

La confrontation de ces réflexions en groupe nous a permis de dégager des pistes de recherche-action à investiguer et de réaliser des ébauches de documents méthodologiques à proposer en expérimentation. Elles permettraient aux formateurs et aux apprenants de travailler plus concrètement sur le processus d'apprendre à apprendre à partir de situations réelles et complexes d'apprentissages professionnels.

#### En ce qui concerne l'organisation :

Quelles conditions doivent remplir l'organisation du travail pour que les situations de travail initialisent une dynamique d'apprentissage en liaison avec ou en prévision d'un changement ? En quoi la théorie et les pratiques d'apprentissage organisationnel (Argyris et Schon) sont une des conditions de faisabilité d'une telle dynamique en reconnaissant et en valorisant la principale ressource actuelle des entreprises modernes : la ressource humaine.

J' alimenterai et illustrerai ces pistes de recherche-action par mon expérience de consultant auprès des entreprises ( externes et interne), par quelques exemples d'apprentissages organisationnels que j'ai menés : analyse de fonction par des ouvriers et techniciens au Commissariat de l'Energie Atomique, élaboration d'un outil d'information et de formation technique par un groupe d'ouvrières ( entreprise LITA- PHILIPS), et histoire de vie d'une pratique de formation innovante ( d'une équipe de formateurs informatiques du Centre de Formation Professionnelle d'Adultes de Roubaix).

Quelques repères théoriques pour approcher l'articulation Ap. apprentissage, adaptation et évolution à partir de la problématique du changement et de la théorie de l'apprentissage organisationnel:

*"A chaque fois qu'il y a un processus de changement il y a un mécanisme d'apprentissage : l'apprentissage de nouveaux modes de raisonnement, de nouvelles formes de relations ou de nouvelles manières de travailler ."*

De toujours trouver de "l'apprentissage" au coeur même du changement suggère qu'il en constitue peut-être l'invariant, la loi, ou encore le métaniveau au sens de BATESON.

Nous pouvons alors tenter de représenter la situation comme suit :

- niveau 1 : le changement,
- niveau 2 : la théorie du changement,
- niveau 3 : la théorie de l'apprentissage ( comme théorie de la théorie du changement)

Appliquée au champ des organisations, l'hypothèse suggère que la nouvelle théorie de l'organisation dont nous guettons l'apparition pourrait bien se situer du côté d'une théorie de l'apprentissage organisationnel.

C'est le pari effectué par quelques praticiens-chercheurs du côté de San Francisco. Partant de l'idée très constructiviste selon laquelle nous transportons chacun l'organisation et son environnement dans notre tête, ils définissent l'apprentissage organisationnel comme l'opération par laquelle il est possible d'augmenter le savoir collectif d'une organisation en faisant évoluer les modèles mentaux partagés par ses membres.

L'analyse repose sur la distinction en 5 niveaux d'apprentissage :

- \* 3 niveaux développés par Chris ARGYRIS et Donald SCHON
- \* et 2 niveaux rajoutés par G. POR .

- \* niveau 1 : apprendre en simple boucle ( quelle est mon erreur ?)
- \* niveau 2 : apprendre en double boucle ( pourquoi cette erreur s'est-elle produite ?)
- \* niveau 3 : apprendre à apprendre ( comment je peux apprendre en simple et double boucle à raisonner au sujet d'une erreur ?)
- \* niveau 4 : apprentissage évolutionnaire intégrant les échanges avec l'environnement.
- \* niveau 5 : apprentissage émergent intégrant le surgissement créatif.

Ces 5 niveaux hiérarchisés définissent des qualités d'apprentissage progressives.

La démarche de l'"ORGANIZATIONAL LEARNING" avec les outils qu'elle a développés reste encore très empirique.

Pour que l'apprentissage organisationnel intervienne il faut que les découvertes de ceux qui ont appris, leurs expériences, leurs inventions, leurs évaluations, ... soient inscrites dans la mémoire de l'organisation et alimentent de manière significative une politique d'innovation lui permettant de s'adapter voire d'évoluer.

Nous étudierons la place et le rôle de la formation dans ce processus d'apprentissage initialisé et alimenté par la pratique des personnes .

Nous examinerons en particulier l'hypothèse de la nécessité de l'aide d'un observateur, d'un "accoucheur" extérieur au service du SUJET dans un tel processus. Le sujet, compte tenu de la confrontation entre ces observations extérieures et sa propre réflexion intérieure, va développer son processus d'apprentissage voire valider ses acquis à travers la socialisation et la conceptualisation de sa pratique, de sa formation expérientielle.

## « LA FIRME: UN SYSTEME ARTIFICIEL EVOLUTIF »

Le rythme accéléré des mutations économiques, technologiques et industrielles qui entraînent dans leurs sillages fusions, absorptions, mutations, croissance, régression, rend présente à tout moment la dimension temporelle de la réalité et appelle une réflexion sur l'évolution des firmes.

Quels sont les profils d'évolution des firmes? Quels sont les déterminants de l'évolution des firmes?

Notre propos est d'identifier et d'analyser les processus évolutifs des firmes. Nous tentons de les appréhender dans toute sa complexité, à l'aide de l'approche systémique.

Il est évident que la tendance à croître, à se développer, ainsi que l'accélération des processus technologiques, créent, à l'intérieur et autour de la firme, un tissu d'interdépendances de plus en plus complexes et difficiles à contrôler.

Néanmoins, si les firmes ont une tendance à évoluer vers des états de complexité plus élevés, elles restent soumises, comme toute organisation, à la dégradation, à l'usure, au vieillissement, du fait par exemple d'un processus de formalisation.

Pour préciser les aspects descriptifs et explicatifs de l'évolution des firmes, nous établissons un parallèle avec l'évolution des systèmes naturels auto-organiseurs. Dans cette hypothèse, il semble apparaître que l'évolution de la

firme soit: - conditionnée par sa capacité à s'adapter et sa  
créativité;

- ouverte;

- liée à l'évolution de l'environnement.

Litumba PIYA-LEKI  
Laboratoire d'Aménagement Régional et Urbain  
Ecole Centrale de Lille

adresse pour la correspondance: 17/11, rue Turgot  
59150 WATTRELOS

# **Vie artificielle et naturelle**

# Le pari de la Vie Artificielle

E.Bonabeau

Télécom Paris  
46, rue Barrault  
75013 PARIS  
bonabeau@inf.cnst.fr

## Présentation

La vie artificielle constitue un champ de recherches renaissant et apparemment exotique, qui rassemble des disciplines variées -biologie, sciences cognitives, informatique (théorique et appliquée), chimie, philosophie, physique, ...-et permet l'étude polymorphe de la vie. Non pas 'seulement' de la vie telle que nous la connaissons, mais également, comme le dit Chris Langton, de la vie "telle qu'elle aurait pu être". Et c'est là qu'un pari est fait, le pari que la vie puisse être étudiée indépendamment de son substrat, un pari supposant avec ardeur l'existence de formes de vie potentielles, fondamentalement différentes de celles qui nous entourent, bref un pari très fort : l'essence de la vie réside dans la forme et non dans la matière, une étude des principes formels de la vie est possible. Claus Emmeche résume bien la question qui se pose alors, c'est à dire la nature du pari : "Life as an Abstract Phenomenon : Is Artificial Life Possible ?". Mais dans cette question, le terme Artificial Life décrit me semble-t-il les notions de réalisations artificielles de la vie, le concept de vie artificielle en tant que manifestation, plus qu'il ne concerne réellement la Vie Artificielle en tant que programme de recherche. Je me propose ici de montrer cette affirmation, en montrant sur quoi repose le pari -tout se construit autour des théories de l'émergence qui sont au centre de la Vie Artificielle à la fois comme justifications épistémologiques et comme objectifs de recherche-, pourquoi certains ont jugé qu'il était raisonnable de prendre ce pari, et comment enfin ce pari ne peut être gagnant pour la science.

## 1 Vie Artificielle : modèles

Dans ce paragraphe, la vie artificielle est présentée, avec quelques exemples illustrant sa nature et son projet.

### 1.1 Diagramme de situations

Dans le schéma ci-dessous, nécessairement imparfait, deux dimensions servent à représenter les modèles de la vie artificielle. Ces deux dimensions sont figurées par deux axes, l'un servant à mesurer le niveau de description utilisé dans le modèle ou la simulation (du quark à la population sociale), et l'autre - sans doute plus arbitraire-, indiquant le degré d'abstraction (du réel à l'objet mathématique pur) que je préfère appeler éloignement apparent du réel phénoménologique. Les implications philosophiques du choix de tels axes et de leurs graduations ne me concernent pas ici.

L'axe des abscisses possède une forte ressemblance avec une description des systèmes biologiques et de leurs constituants de Karl Popper :

- Biologie :

(12) Niveau des écosystèmes

(11) Niveau des populations de métazoa et de plantes

(10) Niveau des métazoa et des plantes multicellulaires

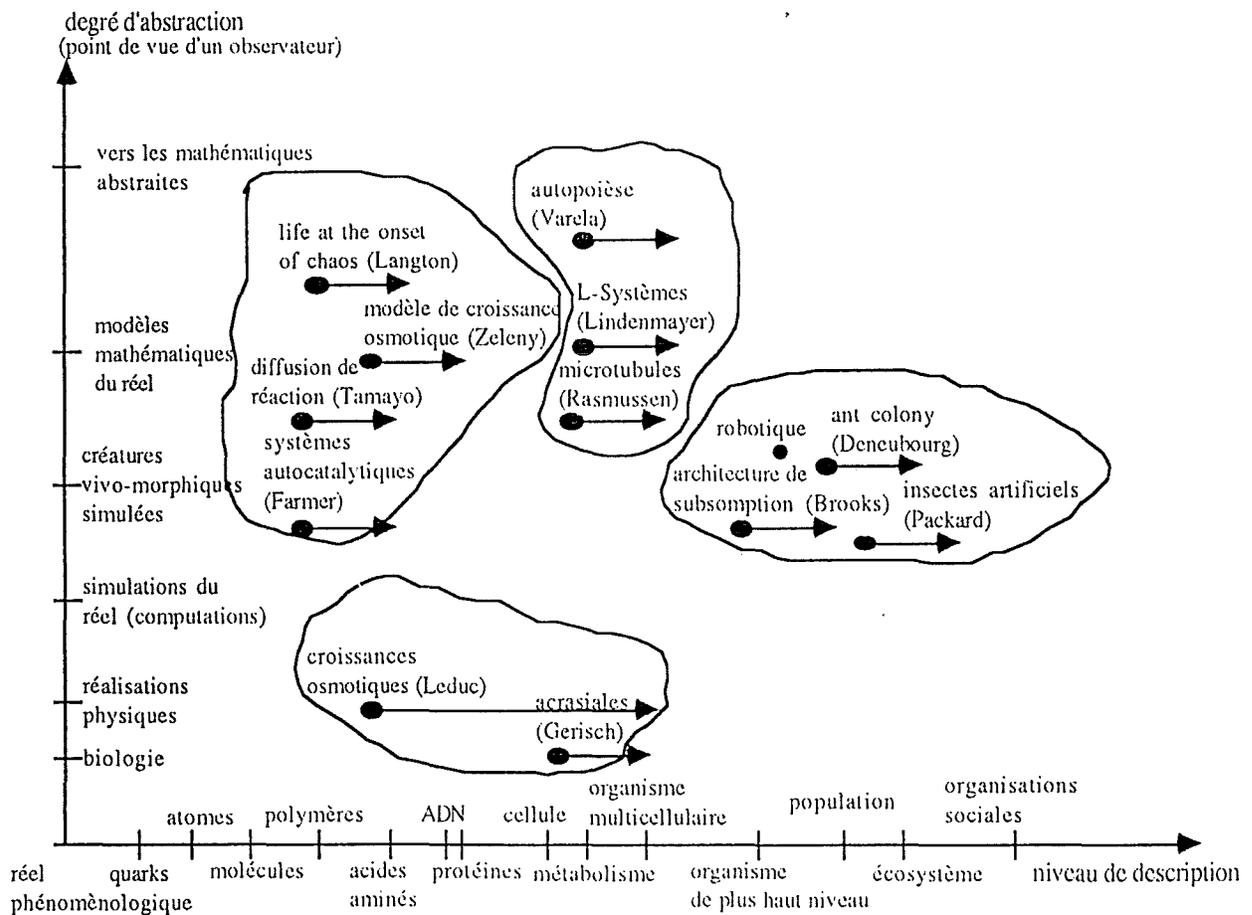
(9) Niveau des tissus et des organes

- (8) Niveau des populations d'organismes unicellulaires
- (7) Niveau des cellules et des organismes unicellulaires
- (6) Niveau des organelles et des virus

- Chimie :
- (5) Liquides et solides
- (4) Molécules

- Physique :
- (3) Atomes
- (2) Particules élémentaires
- (1) Particules sub-élémentaires
- (0) ?

L'autre axe présente un lien de parenté -beaucoup plus éloigné- avec un autre classification de Popper, celle du modèle des trois mondes : le monde des objets physiques (hydrogène, hélium, liquides, cristaux, organismes vivants), le monde des expériences subjectives (conscience animale, conscience de soi et de la mort), le monde des productions de l'esprit humain (connaissance objective, langage, théories du soi et de la mort, art et sciences). Ici, l'axe des ordonnées ne correspond à aucune notion d'évolution phylogénétique, il décrit les différents degrés d'abstraction dans la connaissance objective (où objectivité désigne une notion de connaissance indépendante de l'observateur *humain*, donc liée à un observateur humain générique -s'il existe).



Les petits disques noirs indiquent la position du modèle dans le plan, tandis que les flèches posées sur les disques montrent le sens de la "dynamique" du modèle : en effet, il me semble que les réalisations de la vie artificielle ont presque toutes pour but de simuler ou de modéliser des aspects de systèmes vivants dans une phase développementale, adaptative ou évolutive, bref de simuler ou de modéliser des manières de procéder à des mouvements horizontaux sur le diagramme précédent. De façon générale, les modèles et simulations cherchent à faire passer un système donné (ensemble de molécules, de cellules, d'organismes multicellulaires) à un niveau supérieur (macromolécules, organismes multicellulaires, populations) intégrant souvent un grand nombre de systèmes du niveau inférieur interagissant (mais pas

nécessairement : les théories de l'apprentissage par exemple visent à fabriquer un individu nouveau mieux adapté à son environnement, ou un individu qui 'sait' mieux; mais l'évolution ontogénétique correspond elle-même à un mouvement horizontal sur le diagramme précédent, un mouvement implicite qui permet de donner à l'ensemble des flèches la signification 'vers un système mieux adapté'. Rien n'empêche par ailleurs de penser qu'un modèle à un certain niveau de description -pourquoi pas un modèle d'apprentissage- est réductible à un modèle d'un niveau inférieur, plus explicatif : l'apprentissage d'un système au niveau macroscopique peut être étudié de manière microscopique comme le résultat d'interactions entre ses constituants et de ses constituants avec l'environnement; tout dépend donc de ce dont le modélisateur veut rendre compte et de ce qu'il veut expliquer.). Une exception notable à cette tendance générale est une partie de la robotique : si les réactions du robot face à l'environnement sont préspecifiées, celui-ci ne deviendra pas mieux adapté, même si les outils utilisés pour concevoir le robot intègrent des servomécanismes, qui sont adaptatifs -en un sens restreint du terme.

## 1.2 Une brève description de quelques modèles

Les modèles du diagramme précédent -qui, encore une fois ne donne pas une vue exhaustive de la Vie Artificielle- ont été arbitrairement divisés en quatre sortes de classes qui correspondent tout simplement à des 'clusters' du diagramme :

Classe 1 : modèles chimiques et prébiotiques

- Systèmes autocatalytiques : Les réactions de polymérisation présentent à l'équilibre une distribution de matériaux assez peu intéressante (beaucoup de polymères courts, et relative homogénéité). Toutefois, dans des conditions précises de non-équilibre, le système est amené à produire, grâce à un feedback non-linéaire, un petit nombre d'espèces de polymères bien spécifiques en grandes concentrations. Ainsi, le système fait émerger un métabolisme 'autocatalytique' qui lui permet de prendre des produits de son environnement pour les mettre sous une forme dominante.

- Diffusion de réaction : La diffusion de réaction est un modèle de diffusion de produits chimiques qui produisent spontanément des vagues chimiques. Des équations mathématiques ont permis de décrire cette notion dans un cadre formel. L'étude de cette équation au moyen d'automates cellulaires a permis de visualiser des patterns émergents et d'aller plus loin dans la compréhension des phénomènes. On a en particulier là un exemple pour lequel le modèle discrétisé de l'équation semble mieux coller à la réalité que l'équation elle-même.

- Modèle de croissance osmotique : Le modèle de croissance osmotique proposé par Zeleny repose sur des notions d'autopoïèse. La croissance osmotique est une réalisation physique étonnante décrite dans la classe 2.

- Life at the edge of chaos : Le travail de Chris Langton n'est pas seulement un modèle -ou plutôt un insight- de ce qu'aurait été l'origine de la vie, c'est également et surtout une théorie sur le pouvoir computationnel des systèmes naturels. Ce travail aurait pu se trouver n'importe où (par rapport à l'abscisse) dans le diagramme de situation. Le point de départ est une étude de l'espace des automates cellulaires à une dimension (avec de plus un voisinage et un nombre d'états par cellule fixés). Un paramètre permet d'ordonner les différents automates (ce paramètre est une fonction des règles de transition). Cette étude met en évidence un maximum de complexité au centre de l'échelle entropique, à un endroit où se produit une transition de phase. L'hypothèse de Langton consiste à dire que les systèmes naturels exhibent le même type de transition de phase qui correspond dans le cas des automates cellulaires à une capacité émergente de traitement de l'information.

Classe 2 : réalisations

- Croissance osmotique : La croissance osmotique est une manifestation physico-chimique observée par Stéphane Leduc au début de ce siècle. Une précipitation de  $\text{CaCl}_2$  dans du  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  saturé donne naissance à une figure arborescente complexe en moins d'une demi-heure par diffusion osmotique. Cette figure, opaque et morphogénétiquement intéressante semble reproduire une organisation trouvée dans des systèmes vivants, et ceci à partir de matière tout à fait inorganique. Cela suggère que la morphogenèse des systèmes vivants peut avoir des fondements inorganiques très simples.

- Acrasiales : Une espèce d'acrasiales (*Dyctostelium Discoïdeum*) "satisfont à des interactions cellulaires à longue portée, de nature répulsive ou attractive selon l'étape du cycle cellulaire : on observe une répulsion après la germination, une attraction en présence de nourriture vers celle-ci, enfin en l'absence de nourriture une distribution uniforme qui ultérieurement se transforme en un certain nombre de points d'agrégation susceptibles de se différencier"[4]. On a donc là un "organisme" multicellulaire qui selon le point de son cycle de vie se trouve sous la forme d'un organisme effectif ou sous la forme de cellules éparpillées. Cet exemple qui nous est donné par la nature soutient bien l'hypothèse excitante selon laquelle la formation d'organismes complexes peut être le résultat émergent de l'interaction de processus relativement simples.

Classe 3 : modèles de formations d'organismes multicellulaires (et de leur unité)

- Microtubules : Les microtubules sont des éléments de réseaux connexionnistes. Les réseaux connexionnistes classiques utilisent les neurones et les synapses comme éléments de base. Les microtubules sont un modèle du cytosquelette, réseau de filaments protéiques contenus dans l'intérieur des cellules eucaryotes. Ces réseaux assument un rôle de communication et d'organisation dynamique de la cellule (communication interne et coordination d'événements complexes comme croissance et division). Le cytosquelette des neurones peut être modélisés sous la forme de microtubules simulables par automates cellulaires.

- L-systèmes : Les L-systèmes sont des modèles de croissance d'organismes multicellulaires. Ces modèles, qui permettent en particulier de rendre compte de la morphogenèse des plantes, fonctionnent par utilisation de règles de réécriture. Par exemple a->aba et b->aab permettent à partir d'un composant initial (l'axiome) et par application itérée des règles d'aboutir à de longues chaînes de composants traductibles graphiquement.

- Autopoïèse : l'autopoïèse est une propriété théorique de systèmes vivants capables d'auto-production. Un système autopoïétique est une entité qui peut être différenciée de son environnement par un observateur, et qui est réalisée par une organisation fermée de processus de production tels que (1) cette même organisation de processus soit créée par interactions de ses propres produits qui sont par là ses constituants, et (2) qu'une limite topologique discernable émerge comme résultat des processus. L'organisation des composants est maintenue et reste invariante pendant les interactions et le flux continu des composants : ce sont la structure du système et ses composants qui évoluent, pas son organisation.

Classe 4 : modèles d'organismes de haut niveau et de leurs interactions

- Robotique : La robotique ne demande aucun commentaire particulier. Il s'agit là d'une discipline plus que d'un modèle. Le but est généralement de créer des systèmes pouvant reproduire certains aspects primitivement adaptatifs : le fait que les roboticiens soient confrontés à la réalité de l'implémentation des interactions du robot avec le monde les met dans une situation qui ne leur permet pas la même souplesse que la simulation, mais leur fait prendre une conscience aigüe de la complexité du monde phénoménologique.

- Architecture de subsomption : L'architecture de subsomption a été introduite par Rodney Brooks pour répondre à la robotique classique dont le schéma horizontal comprend une séquence de tâches qui doivent être effectuées par le robot : perception, modélisation, planification, exécution, contrôle moteur (schéma fonctionnel). Ce schéma est remplacé chez Brooks par une décomposition non plus en fonctions mais en comportements : éviter les objets, marcher, explorer, construire des cartes, identifier les objets, etc... Si chaque comportement est jusqu'ici spécifié, le comportement global émerge de l'interaction entre les divers comportements dont le flot de contrôle est parallèle. Un bon exemple en est le robot à six pattes de Pattie Maes et Rodney Brooks qui apprend à marcher (le comportement global est une marche non triviale).

- Ant colony : L'analogie est évidente. Dans la nature, on a des exemples de colonies d'insectes qui semblent avoir une organisation très structurée : les fourmis (division a priori décentralisée du travail), les abeilles, les termites (le résultat spectaculaire du travail des termites est la réalisation d'une arche qui part de deux côtés à la fois et qui se rejoint au sommet). Cette organisation émergente de haut niveau a donc inspiré les modélisateurs qui ont espéré reproduire des comportements structurés à partir d'interactions très locales.

- Insectes artificiels : Dans ces modèles, ce n'est pas la coopération des insectes d'une même espèce en vue de produire un comportement de haut niveau qui est modélisée, mais l'émergence d'un écosystème tout entier.

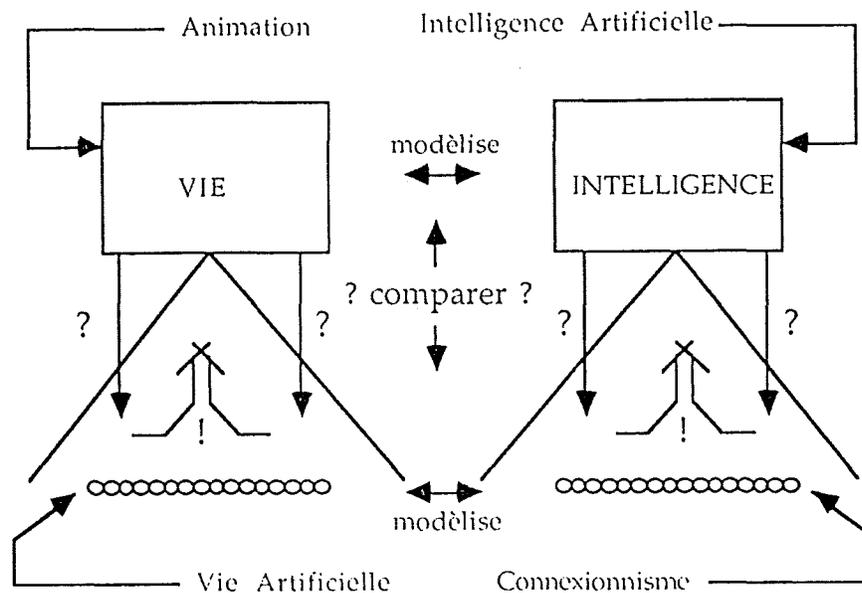
## 2 Genèse du pari

Dans ce paragraphe, les fondements du pari de la Vie Artificielle sont décrits : le diagramme de principe indique très clairement la méthodologie de la Vie Artificielle dont les fondements sont ensuite analysés.

### 2.1 Diagramme de principe

Le diagramme de principe suivant provient de l'article introductif de Chris Langton dans les actes de la première conférence sur la vie artificielle de 1987. Cet article constitue à la fois une présentation des raisons qui ont présidé à l'organisation d'un champ de recherches sur la vie artificielle, mais également

un plaidoyer pour le programme ou la méthodologie de recherche de la vie artificielle.



La figure y porte la légende suivante : "The bottom-up versus the top-down approach to modeling complex systems". En fait, cette figure est au cœur de la vie artificielle : puisqu'il semble plus difficile de partir des manifestations de la vie et de l'intelligence pour remonter à leurs substrats - théorique, matériel, computationnels -, que de partir d'observations de simulations computationnelles et de constatations théoriques qui permettent de faire le lien avec ces manifestations, l'approche bottom-up s'impose.

"The most surprising lesson we have learned from simulating complex physical systems on computers is that complex behavior need not have complex roots. Indeed, tremendously interesting and beguilingly complex behavior can emerge from collections of extremely simple components."

L'idée audacieuse qui se dégage de cette constatation est que des comportements très complexes, comme la vie par exemple, peut avoir des racines très simples. La difficulté d'une approche descendante dans l'étude des phénomènes complexes amène naturellement à considérer la synthèse -ascendante- de comportements complexes à partir de générateurs simples et interagissant entre eux et avec leur environnement extérieur. Et l'on voit bien ici ce qui pousse à prendre le pari de la Vie Artificielle : les sciences de la complexité ont depuis quelques années connu un essor remarquable -en particulier grâce à l'augmentation fantastique de la puissance des ordinateurs-, et la notion d'émergence s'est développée jusqu'à devenir un apparent point clé des "sciences de l'incompris"; le succès de modèles simples faisant émerger des comportements ou des structures complexes a amené des chercheurs à prendre le pari de la vie de la vie artificielle, le pari de l'émergence vue comme explication d'un grand nombre de phénomènes. Il est vrai que les modèles exposés dans le paragraphe précédent sont profondément porteurs d'espoirs, et la modélisation de phénomènes naturels à partir du principe qui vient d'être brièvement décrit a eu des succès, des L-Systèmes à la modélisation des croissances osmotiques. Les structures auxquelles ont abouti ces expériences sont sans aucun doute possible vivo-morphiques par certains aspects. En ce sens, le programme de recherche Vie Artificielle est possible : toute modélisation d'un système naturel est incomplète, et ce sont donc certains aspects du système qui sont modélisés, et ceci dans toute science ayant à modéliser des systèmes naturels. Donc, pour que le programme de recherche soit épistémologiquement acceptable, il suffit qu'il parvienne à rendre compte d'un certain nombre d'aspects des systèmes vivants, et c'est le cas de la Vie Artificielle. Il sera revenu plus loin sur l'ambition ultime de la Vie Artificielle, capturer l'essence de la vie : mais n'est-ce pas le lot de toute science que de toujours tendre vers la capture de l'essence de ce qu'elle modélise sans jamais y parvenir ?

## 2.2 Situation de l'intelligence artificielle

Dans le diagramme de principe précédent, un parallèle est fait entre l'Intelligence Artificielle et la Vie Artificielle. Il est certain que l'idée de créer un lien entre les deux est pertinente. Il est possible et souhaitable que la Vie Artificielle puisse tirer parti des erreurs de l'Intelligence Artificielle. Mais la question se pose de savoir quelle est aujourd'hui la situation de l'IA : le parallèle entre le connexionnisme et la Vie Artificielle est relativement paradoxal, en ce que le point de vue du connexionnisme consiste à

rapprocher la cognition de son implémentation matérielle alors que l'approche de la Vie Artificielle serait plutôt d'étudier la vie indépendamment de son substrat. On peut rapprocher le connexionnisme de la Vie Artificielle sur deux points :

1- l'hypothèse du neuro-mimétisme est quand-même que l'on peut étudier formellement le substrat neuronal, ou du moins qu'on peut en modéliser certains aspects dont les propriétés sont essentielles : comme le cerveau fait partie d'un système vivant, et que le connexionnisme consiste en l'étude et l'utilisation de propriétés émergentes d'assemblées de modèles formels d'éléments vivants, le connexionnisme fait partie d'une approche 'Vie Artificielle';

2- les deux approches procèdent d'une dynamique ascendante, où ce ne sont plus les phénomènes per se qui sont modélisés mais le substrat qui peut leur donner naissance, et l'intérêt peut se focaliser ensuite sur les outils formels utilisés pour modéliser, qui indépendamment du besoin qui les a rendus utiles offrent des insights pour la compréhension d'un grand nombre d'autres phénomènes.

L'Intelligence Artificielle, vue comme la tentative de modéliser certaines propriétés de certains systèmes vivants, est une composante de la Vie Artificielle, et procède du même type d'approche dans sa partie connexionniste.

### 2.3 Emergence : Définitions et Critiques

Les théories de l'émergence se situent au centre de la Vie Artificielle, mais le concept même d'émergence est mal défini -ou plutôt est trop défini : chacun a sa définition de l'émergence -.

Stéphanie Forrest définit la notion de computation émergente : une telle computation demande qu'un certain nombre de critères soient satisfaits :

(i) il faut une collection d'agents, chaque agents suivant des instructions explicites;

(ii) il faut des interactions entre ces agents (ces interactions respectent les instructions précédemment citées), qui conduisent à la formation de patterns globaux au niveau macroscopique (épiphénomènes);

(iii) enfin, il est nécessaire qu'une interprétation des épiphénomènes comme computations soit possible.

Le deuxième point indique que l'émergence résulte d'un changement de niveau. Le troisième point indique clairement l'importance de la relation système-observateur. L'émergence est donc liée à un changement de niveau d'observation. C'est l'observateur qui donne le statut de computation à un phénomène, c'est lui qui de manière générale (pour des phénomènes émergents non nécessairement 'computationnels') donne l'interprétation émergente : il est à cet égard significatif que la plupart des outils employés pour détecter l'émergence soient des outils visuels et graphiques. La subjectivité -ainsi que les faibles possibilités - de notre système visuel rend donc toute interprétation d'émergence très fragile.

Cette conception de l'émergence est très proche de celle de Douglas Hofstadter pour qui l'émergence correspond à la présence au niveau collectif de propriétés ou de structures qui sont absentes au niveau inférieur. En fait, on peut remonter en 1874 pour retrouver une vision très similaire de l'émergence (G.-H.Lewes) : "Theory according to which the combination of entities of a given level realizes a higher-level entity whose properties are entirely new".

Piaget adopte un point de vue relativement semblable -en fait dans le flou qui entoure les conceptions de chacun, il est certain que les définitions se ressemblent : il applique la notion d'émergence à la description du comportement de populations qui comprend trois composantes, (1) la composition, qui est la propriété macroscopique de la population vue comme un tout, résultat de (2) l'émergence qui est le processus par lequel une société vue comme un tout engendre de nouvelles propriétés vis à vis des individus, et par lequel ces nouvelles propriétés sont imposées aux individus, et (3) la totalité relationnelle qui comprend l'ensemble des interactions qui modifient les individus et expliquent les variations dans les propriétés du tout. On voit que cette définition intègre une notion de rétroaction, de la propriété globale vers les individus -les individus interagissent entre eux mais également avec l'environnement, qui se trouve modifié par le comportement global de la population, ce qui explique comment peut se faire le feedback.

Pour Chris Langton, l'émergence est une propriété des systèmes non-linéaires, en ce que le principe de superposition des systèmes linéaires, qui empêche toute surprise à un niveau global (le comportement du tout est purement et simplement la somme des comportements de ses parties), ne peut s'appliquer. Mais cette définition pose quelques problèmes : elle est trop générale, imprécise et inexacte.

(i) elle est trop générale parce qu'un système non linéaire quelconque ne présente pas nécessairement de comportement émergent : peut-on dire par exemple que la résistance de résistor placés en parallèle est émergente ? Il me semble que non, et pourtant la relation qui définit cette résistance est non linéaire :

$1/R = (1/R_1) + (1/R_2)$ , contrairement au cas où les résistors sont placés en série  $R = R_1 + R_2$ . Le caractère

non-émergent vient de ce que la relation est déterministe et peut s'appliquer à un petit nombre d'éléments: la résistance de l'ensemble est donc parfaitement connue. Il est vrai que je présuppose là la nécessité d'un observateur pour parler d'émergence.

(ii) elle est imprécise : on peut dire qu'un phénomène est émergent s'il est le résultat d'une action par laquelle 'le tout exprime PLUS que ses parties', mais alors le problème est de savoir ce que signifie le PLUS. Il me semble que si le comportement du tout est qualitativement comparable à celui de ses parties -comme dans le cas des résistors-, alors il n'y a pas émergence (ou peut-être dans un sens faible), le tout a un comportement comparable à celui de ses parties mais ce comportement ne se déduit tout simplement pas de la relation  $F(A+B) = F(A) + F(B)$ ; le plus doit donc décrire une notion qualitative : le tout doit avoir un comportement structurellement neuf, non comparable à ses parties, ce qui nous amène au troisième point,

(iii) la définition est inexacte car dans la relation  $F(A+B) \neq F(A) + F(B)$ , la non linéarité du système est une propriété qui s'exprime par une comparaison du comportement du tout avec celui de ses parties : on retrouve donc non seulement ici la trop grande généralité de la définition (cette relation dit seulement: 'si on compare le comportement du tout avec celui des parties, on n'a pas superposition, ce qui est tout à fait insuffisant : le comportement du tout doit être qualitativement inexprimable en termes du comportement de ses parties), et d'autre part l'inexactitude du fait même que l'émergence ne résulte pas dans la fonction  $F$  utilisée pour décrire le comportement d'un composant.

La question de savoir si un observateur est nécessaire pour que l'on puisse parler d'émergence est controversée : il est toutefois certain qu'un observateur est bien utile à la détection des phénomènes émergents ! En fait, que l'émergence soit intrinsèque à un système ou une propriété de l'ensemble système-observateur n'empêche aucunement d'étudier l'émergence du point de vue d'un observateur.

Robert Rosen ne définit quant à lui l'émergence que par rapport à un observateur : nos modèles sont des vision appauvries du monde, et un système observé présente un comportement émergent lorsque de nouvelles observables sont nécessaires à la compréhension du comportement du système : c'est la notion d'émergence relative à un modèle, reprise par Peter Cariani qui propose deux classifications des phénomènes émergents, l'une fonction de l'observateur, l'autre 'de principe'. La première classification consiste à distinguer l'émergence computationnelle (système entièrement spécifié, pour lequel le phénomène n'est pas réellement émergent, il s'agit seulement d'une trajectoire dans un espace d'états), l'émergence thermodynamique (réalisation matérielle d'une trajectoire dans un espace d'états), et l'émergence relative à un modèle, qui introduit la notion d'observables nouvelles (addition de dimensions à l'espace d'états et à la structure interne du système). L'autre classification donne trois niveaux d'émergence : la non-émergence, l'émergence syntaxique (le comportement du tout est exprimable en termes du comportement des parties, comme combinaison -même non linéaire- du comportement des parties), et l'émergence sémantique (créations de fonctions qualitativement nouvelles permettant d'augmenter l'ancrage sémantique dans le monde). Si la première classification est controversée (on a une distinction de principio entre émergences computationnelle et thermodynamique, ce qui débouche sur l'impossibilité a priori de simuler computationnellement des créatures réellement vivantes), la seconde n'en est pas moins fort pertinente.

On peut terminer ce bref tour d'horizon des théories de l'émergence par deux conceptions très proche de celles de Cariani et Rosen : pour Georges Kampis, un système est caractérisé par un reading frame -ses outputs vers l'ensemble du monde -, et la relation observateur-système est caractérisée par un description frame qui est la fenêtre d'observables par laquelle nous étudions le système; l'émergence correspond alors à un agrandissement ou à un glissement du r-frame qui sort de la fenêtre constituée par le d-frame, et ce dernier doit être ajusté. Enfin, Howard Pattee distingue trois types de systèmes possédant des propriétés d'émergence : les systèmes formés d'éléments interagissant (mais cela débouche sur des trajectoires dans un espace d'états : émergence syntaxique), les systèmes créatifs (émergence sémantique), et un dernier type qui introduit encore la notion d'émergence relative à un modèle (il y a émergence lorsque le résultat d'une mesure donne une information, c'est à dire lorsqu'il n'y a plus adéquation entre la description du système et son comportement), mais on voit mal la nature de la classification -comment comparer émergence sémantique et émergence par la mesure ?

Ces trois types d'émergence, que l'on a vu apparaître chez Cariani et Pattee peuvent avoir une sorte de contrepartie mathématique de la manière suivante : un niveau 1 de l'émergence correspond à la relaxation d'un système vers un attracteur, un niveau 2 correspond à une modification du paysage de phase qui crée de nouveaux attracteurs (morphodynamique), et un niveau 3 correspond à une augmentation de la dimension de l'espace. Il s'agit dans ces trois cas d'un espace d'observation qui est en jeu.

## 3 Un pari gagnant

### 3.1 Limites de la Cybernétique : du feedback à l'émergence

On peut voir une grande similitude entre les programmes de recherche de la cybernétique et de la Vie Artificielle, puisque la cybernétique est définie par Norbert Wiener, son créateur, comme "the study of control and communication in the animal and the machine". Le changement fondamental qui fait passer de la cybernétique des années cinquante à la Vie Artificielle des années 90 vient de la nature des outils qui sont mis en œuvre : Norbert Wiener voulait fonder une science sur les concepts nouveaux de contrôle et d'information statistique. Pour lui, la vie et la cognition consistent en des relations entre systèmes ouverts, systèmes couplés avec le monde à la fois pour la réception d'impressions et le réalisation d'actions (Pamela McCorduck voit là un parallèle entre le passage de la notion d'énergie à celle d'information, et le passage du concept de système conservatif à celui de système ouvert. La Vie Artificielle est héritière des motivations de la cybernétique (la robotique, parente directe de la cybernétique possède par exemple une composante intégrée dans la Vie Artificielle), mais possède des armes de modélisation qui semblent bien plus puissantes et universelles que la théorie du contrôle : les théories de l'émergence.

### 3.2 Limites de l'intelligence artificielle : vers une approche ascendante

L'échec de l'Intelligence Artificielle dans son projet originel -modéliser la prise de décision - amène à remettre en cause la méthodologie et les principes qui ont caractérisé l'IA pendant trente ans. Les réseaux connexionnistes constituent une alternative bottom-up à l'approche descendante classique. Le diagramme de principe du paragraphe précédent montre le parallèle que l'on peut faire entre l'Intelligence Artificielle et la Vie Artificielle : l'impuissance de l'Intelligence Artificielle classique plaide en faveur des principes fondateurs de la Vie Artificielle, c'est à dire l'application d'une approche ascendante à l'étude des systèmes vivants (ce qui permettrait au passage de glaner des formes de vie qui n'existent pas).

### 3.3 Des intuitions qui trompent : "Beyond the Centralized Mindset"

#### - Mitch Resnick

Notre intuition des systèmes complexes est parfaitement trompeuse, et quant à notre compréhension des systèmes complexes, elle est pour le moins lacunaire. La métaphore computationnelle a envahi notre monde le plus quotidien, et son influence sur notre manière d'appréhender les problèmes est immense, imposant une sorte d'architecture universelle, cadre de toute analyse du monde extérieur. Il est vrai que d'autre part notre nature nous incite peut-être à penser 'centralisé', c'est à dire à voir en permanence une main organisatrice dans les phénomènes qui nous entourent. Mitch Resnick, au Média-Lab (MIT), tente de développer l'intuition que les enfants ont du comportement de systèmes complexes en les faisant interagir avec des populations de créatures et en les faisant programmer ces populations par des micro-règles simples : les enfants étudient ensuite les conséquences de leur programmation et développent ainsi une vision moins biaisée des conséquences que peuvent avoir des règles micro-locales simples sur le comportement global. Pour de tels enfants, habitués à agir sur des systèmes complexes, certains paradoxes contemporains deviennent simplement une composante bien intégrée du monde (il est à douter que pour eux la conjecture de Von Foerster ait jamais constitué une difficulté conceptuelle). Des expériences menées dans le même groupe ont également mis en évidence notre biais 'animatoire', qui consiste à doter les objets qui nous entourent d'une intentionnalité centralisée.

#### - Henri Atlan

Dans "L'intuition du complexe et ses théorisations", Henri Atlan avance une explication à notre incapacité à comprendre un certain nombre de phénomènes complexes : le fait que l'on trouve des hormones dans le cerveau et des neurotransmetteurs dans le sang, montre que les stratégies d'étude et de description que nous imaginons et qui sont liées au découpage fonctionnel artificiel que nous faisons de systèmes vivants sont impuissantes à expliquer certains phénomènes par nature 'holistiques'. Notre finalité est l'analyse, et induit par là une vision qui souvent est éclairante, mais peut également occulter des propriétés. Quand nous ne comprenons pas un problème, nous décomposons et simplifions, ce qui peut conduire à une incompréhension des phénomènes globaux.

### 3.4 Une meilleure compréhension des phénomènes

Les recherches menées au sein de la Vie Artificielle mènent de toute façon à une meilleure compréhension des phénomènes modélisés -ce qui est évident - et peut aboutir à la capture de l'essence de phénomènes fondamentaux comme la vie -ce qui n'est pas certain mais on peut espérer tout au moins être capable de séparer les problèmes que l'on peut partiellement résoudre avec la méthodologie de la vie artificielle de ceux qui résistent à cette méthodologie : en particulier, on n'arrivera à trancher en faveur de l'émergence comme explication fondamentale de la vie ou contre une telle hypothèse qu'en la testant, et le plus probable est que l'on arrivera à simuler (computation) ou modéliser (spécification) par des théories liées à l'émergence certains aspects systèmes vivants et pas d'autres. Notre compréhension des systèmes vivants va elle-même émerger, au sens de Robert Rosen (émergence relative à un modèle) : cette émergence aboutira à l'enrichissement de nos modèles en de nouvelles observables irréductiblement nécessaire à l'explication du comportement des systèmes.

Les modèles de la Vie Artificielle peuvent également déboucher sur des insights mutuels entre disciplines : un bon exemple en est le modèle de Chris Langton, 'Life at the edge of chaos', qui en créant un lien entre l'informatique théorique et la physique des transitions de phase permet de d'apporter aux théories de la computation un grand nombre d'outils de physique statistique, de thermodynamique, de la théorie de la renormalisation, tandis que l'étude des transitions de phase peut largement bénéficier des apports de l'informatique théorique, en particulier dans le domaine de l'indécidabilité.

## 4 De la circonspection

L'optimisme du paragraphe précédent ne doit pas cacher qu'il existe des objections au programme de recherche de la vie artificielle. Ces objections sont plus de nature philosophique que réellement objectives, et n'influencent pas, à mon sens, la richesse épistémologique de la vie artificielle. Ce sont des objections se présentant sous la forme de questions ouvertes auxquelles la vie artificielle peut justement permettre d'apporter un élément de réponse.

### 4.1 L'avis des biologistes

Pour les biologistes de manière générale, l'étude formelle de la vie est impossible : la vie est propriété de la dualité forme/matière. De même que la lumière n'est ni onde ni corpuscule, mais une conjonction des deux, l'essence de la vie n'est ni forme ni matière mais une intrication profonde des deux. Cette vision vient sans doute de la nature empirique de la biologie, mais ne doit pas en tout cas être prise pour un biais ou un préjugé inutile : il est vrai que la nature présente une infinie complication, et si l'on prend l'exemple de la biologie moléculaire, celle-ci est confrontée à l'immense complexité de la cellule. Il semble bien difficile de séparer les propriétés spatiales des molécules de leurs propriétés de 'traitement de l'information', et ces propriétés ne sont que très rarement prises en compte dans les modèles : les formalisations ne capturent qu'une infime partie du réel, et les modèles peuvent se faire de plus en plus précis, de plus en plus affinés, une infinité d'éléments semblent toujours échapper à la modélisation. Peut-être cette impression vient-elle du nombre apparemment incommensurable de paramètres dont il faut tenir compte, mais le problème reste le même : le temps est court pour modéliser des grands nombres. En ce sens, la matière et la forme sont indissociables, puisque seule la matière est capable aujourd'hui d'implémenter un système prenant en compte tous les paramètres : bref seuls les systèmes naturels sont capables d'implémenter des systèmes naturels dans toute la complexité nécessaire. La question est alors de savoir jusqu'où on peut aller avec un nombre humain de paramètres.

### 4.2 Peut-on simuler tous les aspects de l'émergence ?

Il est certain que certains aspects émergents des systèmes vivants ont pu être modélisés, et encore une fois, cette constatation, à elle seule, justifie épistémologiquement l'existence du programme Vie Artificielle. Mais il n'est pas certain par contre que tous les phénomènes que nous qualifierions aujourd'hui de manière intuitive d'émergents soient modélisables, et il est même improbable que ces phénomènes soient de même nature. L'essence de la vie peut alors se révéler autrement plus difficile à capturer que ne le pense Chris Langton, et les phénomènes qui forment la vie d'une nature autrement plus irréductibles. Peter Ciarani est persuadé que la simulation de la vie par des méthodes computationnelles est impossible, parce que la spécification a priori du système simulé -même si l'on ajoute des règles d'auto-modification- empêche toute émergence forte (relative à un modèle) : en particulier, le hasard est selon lui une caractéristique irréductible des systèmes vivants au plus profond de la matière. Mais encore une fois, cette hypothèse n'est vérifiée de façon certaine par aucune expérience -certaines expériences concernant la séparabilité

forte en physique quantique apportent quelques éléments de réponse mais encore plus de questions -, et se "réduit" à une hypothèse philosophique qui en aucun cas ne peut servir d'argument scientifique.

### 4.3 La nature des objets mathématiques et l'objectivité

Un autre problème de nature philosophique et qui semble irréductible concerne la notion d'objectivité. La pratique des sciences quelles qu'elles soient est tellement imprégnée des langages qui les décrivent -des langages humains utilisant des concepts humains - que la notion d'objectivité semble difficile à définir. En particulier, ce problème est lié à la question savoir si les objets mathématiques préexistent à leur découverte par le mathématicien, ou s'ils sont réellement "inventés" par lui (une célèbre opposition Kant/Platon). En effet, comment vérifier l'une ou l'autre des hypothèses, étant donné le caractère phénoménologique des descriptions que l'on fait des objets mathématiques ? Certains chercheurs des sciences cognitives pensent que même les aspects les plus abstraits de la cognition sont explicables en termes d'expériences sensori-motrices, par exemples en termes de descriptions spatiales (l'idée de topologie cognitive de Lakoff par exemple). Il paraît impossible de séparer le substrat qui "implémente" notre compréhension ou notre intuition des objets mathématiques de ces objets mêmes. La question de la nature ontologique des objets mathématiques me semble donc tout simplement indécidable : on n'aboutit apparemment à aucune contradiction en acceptant l'une ou l'autre des hypothèses qui viennent d'être grossièrement décrites.

### 4.4 La vie artificielle : tout et n'importe quoi

J'aimerais terminer ce paragraphe par une mise en garde des dangers qui guettent la Vie Artificielle, bien que les barrières épistémologiques très fortes imposées dès le départ sur le programme de recherche rendent peu probable un dérapage. Il est vrai toutefois que l'unité des travaux qui sont présentés sous la bannière "Vie Artificielle" n'est pas évidente. On peut avoir l'impression qu'on a à faire à de grands gamins qui s'amuse à faire des simulations sur leurs gros ordinateurs sans véritable but scientifique. D'autre part, le caractère ascendant appuyé des approches qui se situent au cœur de la Vie Artificielle ne doit pas faire oublier qu'il existe un certain nombre de sciences du vivant qui permettent une sorte de contrôle expérimental des théories de la Vie Artificielle (et par là-même une forme de validation de l'approche ascendante par le haut, tout comme les données en provenance de la psychologie cognitive permettent de valider des résultats du Connexionnisme -il est à noter d'ailleurs que les pionniers du Connexionnisme (PDP) sont pour une grande part d'entre eux des psychologues). Or, la Vie Artificielle a rejeté de principio toute forme de validation (même si dans la pratique il en va souvent autrement) en clamant que son champ de recherches concerne non l'étude des systèmes vivants par un approche ascendante, mais l'étude de la vie telle qu'elle aurait pu être -c'est à dire l'étude de quelque chose qui n'existe pas phénoménologiquement (les mathématiques sont un autre exemple illustrant cet aspect, mais la médiation computationnelle rend la position de la Vie Artificielle délicate, entre l'abstraction des mathématiques et la réalité du monde phénoménologique). On peut se demander quel est le statut ontologique de formes qui non seulement sont a priori abstraites mais en plus n'ont jamais été expérimentées : les objets mathématiques semblent eux avoir une certaine forme de prégnance dans nos expériences perceptuelles. A ce propos, Claus Emmeche parle de 'Crazy Artificial Life', ce qui décrit bien le danger encouru par la Vie Artificielle : celle-ci a profondément besoin de contraintes.

## Conclusion

J'ai essayé de montrer dans les paragraphes précédents quels étaient les principes fondamentaux qui ont présidé à la création d'un nouveau champ multidisciplinaire de recherches, la Vie Artificielle, et comment ces principes s'appuyaient sur l'intime conviction que les théories de l'émergence peuvent apporter un grand nombre de réponses; enfin, les théories de l'émergence, si elles n'apportent pas toutes les réponses attendues, n'en sont pas moins des outils prometteurs qui mèneront à la compréhension de phénomènes, ce qui rend le pari de la Vie Artificielle nécessairement gagnant.

# Références

- [1] - E.Bonabeau, "Flowers and beautiful women abound", ENST Paris, 1991.
- [2] - P.Cariani, "On the design of devices with emergent semantic functions", Ph.D dissertation, State University of New York at Binghamton, 1989.
- [3] - P.Cariani, "Adaptivity and emergence in Organisms and Devices", in World Futures, v10.31, pp.49-70, Gordon and Breach Science Publishers S.A, 1991.
- [4] - G.Chauvet, "Traité de physiologie théorique", Masson, Paris, 1987.
- [5] - C.Emmeche, "Life as an Abstract Phenomenon : Is Artificial Life Possible ?", Proceedings of ECAL 1991, MIT Press 1992.
- [6] - F.Fogelman Soulié, "Les théories de la complexité", Seuil, Paris, 1991.
- [7] - G.Kampis, "Emergent Computations, Life and Cognition", in World Futures, vol.31, pp 33-48, Gordon and Breach Science Publishers S.A, 1991.
- [8] - B.-O.Koppers, "Information and the origin of life", MIT Press, 1991.
- [9] - C.Langton, ed., "Artificial Life", Addison-Wesley, 1989.
- [10] - C.Langton, C.Taylor, D.Farmer, S.Rasmussen, eds., "Artificial Life II", Addison-Wesley, 1991.
- [11] - J.-A.Meyer, S.Wilson, eds., "From Animals to Animats", MIT Press, 1991.
- [12] - M.Resnick, "Overcoming the Centralized Mindset : Towards an Understanding of Emergent Phenomena", Epistemology and Learning Memo No.11, November 1990.

**Apprentissage  
et  
résolution de problèmes**

# La Machine Gosseyn : état actuel et recherches en cours

Jean-Marc Fouet  
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes d'Information  
Université Claude Bernard Lyon 1 et INSA de Lyon  
Batiment 710 - 43 Bd du 11 Novembre 1918  
69622 Villeurbanne Cedex  
Tél: 72 44 83 69 - Fax: 72 44 83 64  
Email: fouet@comapo2.univ-lyon1.fr

## 1. Problématique.

Du point de vue des applications, la Machine Gosseyn a pour vocation d'être utilisée et enrichie par des Ingénieurs, Mécaniciens ou autres, soit directement comme aide-mémoire, soit indirectement comme frontal de codes de calcul ou de CAO. Du point de vue de la recherche, elle sert de boîte à outils fédératrice pour explorer les possibilités de développer un système réflexif, ou méta-circulaire, s'améliorant au contact de ses utilisateurs. Elle s'appuie sur les principes suivants :

- développement incrémental ;
- utilisation de méta-connaissances pour trouver, gérer et transformer les connaissances ;
- recours à un parallélisme de très faible grain (actuellement simulé) ;
- introspection, mise à profit pour s'accélérer et améliorer l'interface homme/machine.

On tente ainsi, comme on le verra dans la suite, de répondre aux problèmes suivants :

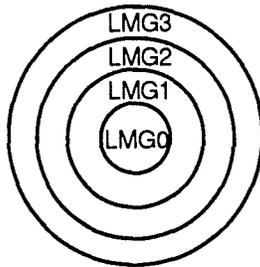
- Dans les domaines techniques, il ne peut pas y avoir de cognicien, car seul celui qui détient la connaissance peut en acquérir efficacement (poser les bonnes questions, déceler les contradictions, chercher à en savoir plus) ; il faut donc que le système soit son propre cognicien.
- Les applications que l'on vise comporteront plusieurs centaines de Méga-octets, dont une partie sous forme de programmes. Aucun être humain n'est capable de produire un tel ensemble, et encore moins de le maintenir. Une collectivité chargée de le faire passerait le plus clair de son temps à organiser son travail. Il faut donc que ce soit le système qui se programme.
- Un logiciel aussi colossal serait inaccessible à ceux qui en ont le plus besoin, c'est à dire des ingénieurs travaillant sur des problèmes complexes (au sens de la pensée complexe), donc insécables, alors que chacun n'est (dans le meilleur des cas) expert que dans un domaine. De plus, ces ingénieurs sont la plupart du temps en situation de stress, pressés par le temps. Le produit complexe doit donc être d'utilisation extrêmement simple, pour chacun. Il faut en conséquence autant d'interfaces homme/machine que d'hommes, et il faut de plus que chaque interface évolue avec chaque utilisateur. Il faut donc que le système fabrique ses interfaces.

## 2. Structure.

La MG peut être vue comme quatre machines virtuelles concentriques, la plus extérieure devant être à terme la seule visible de l'utilisateur. Au centre, LMG0 (langage de la Machine Gosseyn Zéro) est à peu près<sup>1</sup> Common Lisp. Construit au-dessus, LMG1 est

---

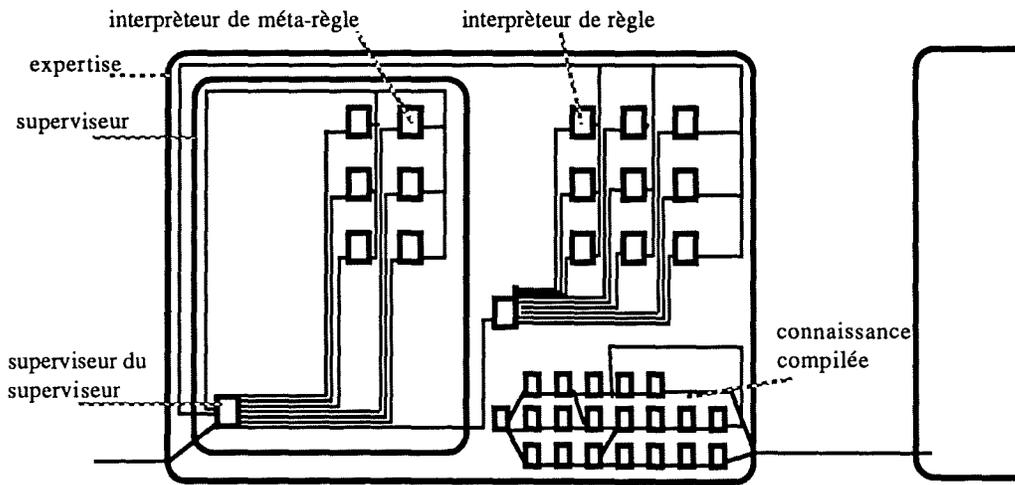
<sup>1</sup> Quelques conventions d'écriture simples permettent à un petit pré-processeur de transformer des fonctions LMG0 en fonctions Lisp plus volumineuses, voire plus nombreuses.



un langage d'acteurs, acteurs qui peuvent emmagasiner de l'information sous forme de triplets attribut/facette/valeur. LMG2 simule des processeurs à flot de données, réalisant le parallélisme massif, qui ne sont en fait que des acteurs de LMG1 un peu particuliers (ils ne connaissent pas le destinataire des messages qu'ils émettent, qui est le processeur dont l'entrée est connectée à leur sortie). LMG3 est un hypertexte, permettant à l'utilisateur de récupérer de l'information en extension (aspect Base de Données) ou en intension (aspect déductif), ou de fournir de l'information, ou d'accéder à un code de calcul ou de CAO.

LMG1 respecte le dogme "tout est acteur", à l'exception du message "new" envoyé à la classe des messages, et, pour l'instant, des constantes numériques. C'est ce respect scrupuleux qui permet à la MG d'avoir accès à sa propre structure, et éventuellement de se modifier. Le fait, en particulier, que les attributs soient eux-mêmes des acteurs, avec leurs attributs, permet de dépasser la Logique du Premier Ordre, puisque d'autre part tout attribut peut être vu comme un prédicat (la réciproque étant fausse) ; on peut par exemple écrire : *pour tout x, si x est un attribut monovalué, et si x est attribut dans moins de 100 objets...*

A chaque règle énoncée par un utilisateur correspond un interprèteur, qui est un processeur à flot de données chargé de tenter d'appliquer cette règle. Les interprèteurs correspondant à des règles traitant du même sujet sont regroupés en expertises. Un interprèteur, sauf avis contraire, ne prend aucune décision : s'il est placé devant un choix, il pose le problème au superviseur de l'expertise. Le superviseur est lui-même une expertise. Le superviseur du superviseur peut à son tour être une expertise. La récursion est arrêtée, au niveau voulu par le concepteur d'une expertise, par un processeur-superviseur, qui soumet le problème, issu de l'une des règles qu'il supervise, à ces mêmes règles<sup>2</sup> : on réalise ainsi le "point fixe des montées aux niveaux méta".



<sup>2</sup> alors que les autres superviseurs soumettent aux interprèteurs qu'ils supervisent les problèmes venant des interprèteurs de la couche immédiatement extérieure

Lorsqu'un interpréteur fait appel à son superviseur, il formule son problème sous forme de message, puis "oublie" ce problème et traite la première requête en attente sur son entrée. La réponse à son problème lui reviendra sous forme d'une nouvelle requête : la MG est donc totalement asynchrone.

### 3. Introspection.

Le respect scrupuleux du dogme "toute action passe par l'émission d'un message" permet au système de détenir l'historique de son activité, donc d'étudier son comportement, soit a posteriori (en "batch" après une session) soit en temps réel (pendant que l'utilisateur réfléchit). Chaque message est un acteur, instance de la classe des messages, et a notamment les attributs suivants :

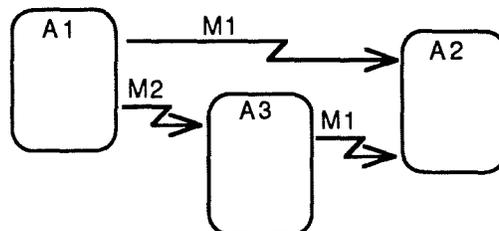
- émetteur (l'acteur qui l'a émis)
- récepteur (un acteur, ou l'ensemble des acteurs qui vérifiaient une certaine formule du Premier Ordre au moment de l'émission)
- sélecteur
- détails éventuels (si la méthode correspondant au sélecteur a des arguments)
- réponse éventuelle (si le message était synchrone)
- date d'émission
- temps cpu de traitement
- temps physique de traitement
- liste des messages que le récepteur a émis pour traiter ce message.

Les paragraphes suivants montrent les utilisations qui sont faites de cette historique.

### 4. Auto-amélioration.

Le critère d'amélioration est le temps de réponse (ultérieurement peut-être on s'intéressera à la qualité de la réponse). Ce critère est traduit en : minimiser le nombre de messages échangés entre les acteurs. Dans l'ensemble des messages échangés au cours d'une session, la MG va chercher des anomalies, c'est à dire des messages dont elle peut montrer qu'ils sont redondants. Elle va ensuite chercher comment elle pourrait supprimer ces redondances. Les solutions dont elle dispose pour ce faire, et entre lesquelles le choix relève d'une expertise actuellement embryonnaire, sont les suivantes :

- correction du code (Lisp) d'une méthode (faute de programmation, précaution inutile) ; on réalise ainsi la *synthèse de programmes à partir de programmes*.
- ajout d'arguments à une méthode : si A1 demande M1 à A2, puis donne l'ordre M2 à A3, et que A3 demande à son tour M1 à A2, on va ajouter le résultat de M1 au message M2, et donc A3 n'aura plus besoin d'émettre M1.



- anté-mémoire : si les  $A_i$  demandent souvent  $M_1$  aux  $A_j$  et reçoivent toujours la même réponse, on va stocker une fois pour toutes la réponse chez les  $A_i$ . Si on ne peut prouver que cette réponse sera immuablement stable, on adjoint aux  $A_j$  un *réflexe si-modif*, qui les amènera à prévenir les  $A_i$  quand la valeur changera. On transforme ainsi de la programmation intuitive en *programmation dirigée par les données*.

- évaluation symbolique : une méthode, destinée à être héritée par de nombreux acteurs, comporte des tests, portant sur les réponses à certains messages qu'elle émet. Dans le cas, notamment, où le message est envoyé à soi-même (par exemple pour connaître la valeur de l'un de ses attributs), s'il s'avère que A1 reçoit toujours R1, que A2 reçoit toujours R2, etc., on peut "customiser" la méthode, en en supprimant non seulement l'émission de message, mais également le test et la branche qui ne sera pas exécutée. Cela est réalisé automatiquement, par évaluation du corps de la méthode en instanciant la variable destinée à recevoir la réponse. Il convient cependant de n'appliquer cette heuristique qu'avec parcimonie, la multiplication des méthodes personnelles risquant de gommer l'économie de messages au profit d'un accroissement du temps de swap.
- ré-arrangement de la hiérarchie d'héritage : si certains A<sub>i</sub> reçoivent toujours la réponse R1 au message M1, certains toujours la réponse R2, etc., on va créer la classe des "acteurs qui reçoivent toujours la réponse R1 au message M1", etc., et supprimer de leur méthode l'émission du message. On autorise ainsi l'expert à adopter une hiérarchie maladroite : c'est *en fonction des utilisations* que la "bonne" hiérarchie sera déterminée. On notera que cette ré-organisation soulève souvent beaucoup d'intérêt de la part de l'expert, qui parfois avoue que lui aussi travaille comme cela mais qu'il a fourni la hiérarchie qu'on trouve dans les livres, et parfois remet en question ce qu'il croit savoir de sa représentation de ses connaissances.

Le problème de l'introspection de l'introspection [Kornman 91] n'est pas pour nous très difficile, dans la mesure où l'introspection est réalisée en "batch" a posteriori : la Machine ne "se" regarde pas travailler, elle regarde comment elle a travaillé ; elle ne "se" corrige pas, elle corrige un source qu'elle intégrera ensuite. Il n'en reste pas moins que, si l'expertise et les algorithmes d'introspection/correction contiennent une erreur, celle-ci va en quelque sorte se comporter comme un virus, créant de nouvelles erreurs dans cette expertise [Pitrat 91]. Nous reviendrons sur ce problème dans le chapitre 8 consacré à la maintenance du système.

## 5. Interfaces homme/machine auto-adaptatives.

Le critère est ici le temps physique passé par l'être humain en face du système. Ce temps se décompose en temps de manipulation, et en temps d'hésitation. La MG modélisant chaque humain par un acteur instance de la classe des utilisateurs, les outils de détection d'anomalie sont en grande partie les mêmes qu'au paragraphe précédent.

On cherche, dans l'ensemble des messages émis par l'utilisateur ("clics" ou textes au clavier), des patterns récurrents. Lorsqu'on en a identifié un, on peut éventuellement indiquer à l'utilisateur qu'il existe une opération plus simple équivalente à la séquence. Sinon, on peut lui proposer de la créer. La mise en évidence de tels patterns est évidemment compliquée par le fait que certaines opérations permutent, et que d'autres, parasites, peuvent venir s'intercaler. On résoud en grande partie ce problème en s'intéressant au problème dual, consistant à suivre les objets sur lesquels portent les commandes [Montoy 91].

Lorsque l'utilisateur n'a pas recours à la valeur par défaut proposée en réponse à une question, on cherchera<sup>3</sup> à déterminer la loi qui permet de trouver la réponse que l'utilisateur a formulée, et donc dorénavant de lui proposer la bonne valeur par défaut.

Lorsqu'il hésite (plus de x secondes sans action), on pourra chercher parmi les patterns d'autres utilisateurs une séquence dont le début est analogue à ce qu'il vient de faire, et lui proposer la suite des opérations.

Les messages d'explication, les opérations de vérification de vraisemblance (par dialogue ou par calcul), pourront progressivement être supprimés.

---

<sup>3</sup> ceci et les points qui suivent font l'objet d'une thèse commençant en Septembre 1991

En prolongement, nous avons l'intention d'approfondir une étude ergonomique, portant sur la présentation de l'écran, et visant à proposer, à chaque instant, l'information pertinente, et seulement l'information pertinente, au bon endroit.

Toutes ces fonctionnalités permettront également, moyennant la connaissance fournie à la MG de la sémantique des commandes, d'utiliser le système comme frontal d'un autre, par exemple un code de calcul ou un outil de CAO.

## 6. Compilation de connaissances.

Les interpréteurs de règles de LMG2 ont deux avantages : toutes les décisions sont explicitées au niveau méta, et ils permettent d'utiliser toute la puissance du déclaratif (chaînages avant et arrière, modi ponens et tollens). Leur inconvénient est d'être extrêmement lents. On a donc mis en place d'autres processeurs à flot de données, qui permettent de représenter une règle par une succession de vérificateurs de prédicats suivie d'une succession d'affirmateurs (voir l'exemple en annexe). Une expertise<sup>4</sup> détermine, à partir de l'introspection et/ou de connaissances fournies par des humains, dans quel ordre il convient de placer ces processeurs. L'intérêt de cette transformation est nul pour une règle isolée, mais croît avec le nombre de règles, du moment qu'elles ont des prémisses communes (une seule évaluation pour toutes les règles contenant la même prémisse), et des prémisses qui sont conséquents d'autres règles (propagation "câblée", de la sortie d'un affirmateur à la sortie du vérificateur du même prédicat). La *réflexion* (dans les interpréteurs) est alors remplacée par des *réflexes* (le long des arcs du treillis) très fortement parallèles. Cette compilation, incrémentale, relève évidemment d'une expertise. L'introspection permettra en outre de la remettre en cause, et de réarranger parfois les circuits. Ensuite, on devra, ayant isolé des circuits remarquables, les traduire en un nouveau processeur élémentaire, plus efficace encore (car programmé en Lisp). Bien entendu, les connaissances de compilation des connaissances s'appliquent à elles-mêmes.

## 7. Acquisition de connaissances.

Détenant les connaissances déjà extraites du ou des experts, la MG est en mesure de "discuter" toute nouvelle connaissance. Cette discussion porte notamment sur la cohérence (prémisses communes et conséquents potentiellement antagonistes, par exemple) et la complétude (absence d'un prédicat qu'on trouve d'habitude, dans un environnement similaire, par exemple). Elle permet à l'expert d'affiner son discours, et au système de noter des relations entre certains concepts, et des sources de conflits ultérieurs (lors de l'exécution). D'autre part, au cours de l'acquisition, le système cherche à accumuler (par raisonnement ou par des questions) de la méta-information : tel prédicat est-il coûteux, telle règle doit-elle impérativement être évaluée avant telle autre, etc [Nouira 91].

L'acquisition a également pour rôle la détection des synonymes (s'appuyant sur la similarité des structures, on peut arriver à demander à l'expert si "son module d'élasticité" n'est pas la même chose que "le module d'Young de Mr. X", dont on sait déjà qu'il est identique au "E" des formules. Elle devra également, à terme, traiter des homonymes, en s'abstenant de demander si le "N" d'une formule chimique est une négation, l'azote, ou le nombre d'Avogadro.

Elle a enfin la charge de décider si une règle donnera lieu à la création d'un interpréteur, ou sera traduite par un réflexe ; par exemple, la règle *si x est lié à y et si y est dans la position z, alors x est dans la position z*, pourra efficacement être traduite par un mécanisme ajoutant la facette *si-besoin, voir position de y* à l'attribut *position* de l'objet *x*. On prend ainsi a priori certaines décisions que l'introspection aurait prises plus tard.

---

<sup>4</sup> il s'agit actuellement d'un algorithme, décrit dans [Fouet 87], mais une thèse commençant en Septembre 1991 doit réaliser ce qui est décrit ici

Bien évidemment, les connaissances d'acquisition des connaissances s'appliquent à elles-mêmes.

## 8. Maintenance.

Avant d'apporter une modification au comportement de l'un de ses composants, ou à la structure d'un ensemble de ses composants, la Machine doit s'assurer qu'aucune conséquence d'une telle modification ne sera néfaste ; en d'autres termes, et en faisant référence au célèbre rapport du DoD (Monterrey 1972), elle doit payer les \$4000 de maintenance, au lieu des \$75 d'écriture initiale. Ceci ne lui coûtera probablement pas \$4000, car elle a la supériorité sur nous de pouvoir suivre les chemins et les récursions sans s'y perdre, et sans rien oublier. Il nous "suffit" donc de lui donner les connaissances nécessaires au maintien de son intégrité, connaissances que nous détenons.

Il y a par contre deux domaines dans lesquels nous sommes un peu mal à l'aise : la réutilisation de ce qui a été fait avant modification ("upward compatibility"), et la transmission des modifications ("releases").

Compatibilité : Toutes les opérations de l'utilisateur ayant amené la Machine dans un certain état sont enregistrées sur un fichier, sous forme de fonctions Lisp. L'utilisateur peut ainsi, partant d'un état antérieur  $S_i$  de la Machine, faire "rejouer des sessions", pour l'amener "en batch" à un autre état  $S_{i+p}$  (quitte à avoir préalablement édité le fichier, par exemple en corrigeant une erreur pour amener le système à un état différent  $S'_{i+p}$ ). Ceci répond notamment à la question soulevée au §4 ci-dessus, dans la mesure où l'on peut toujours "corriger les corrections", et repartir d'un état correct. Par contre, une amélioration fondamentale portant sur la forme même des connaissances, et portée directement dans la source, peut faire que le système ne soit plus capable de relire certains fichiers (voir schéma en Annexe 2). Il serait donc souhaitable qu'il puisse, au vu de la date d'écriture d'un fichier, le "relire comme avant" ; l'alternative serait qu'avant de s'améliorer il récrive tous les fichiers qu'il ne pourra plus relire, mais on verra au paragraphe suivant que cela n'est pas possible.

Versions : La MG est utilisée par différentes personnes sur différents sites, qui petit à petit se font "leur MG". Lorsque l'une de ces machines a trouvé une auto-amélioration intéressante, comment en faire profiter les autres? Nous n'avons pas à l'heure actuelle de réponse à cette question. Mais pour ne pas en interdire définitivement la possibilité, nous ne permettons pas à la Machine de modifier les fichiers qui permettent de la recréer.

## 9. Applications.

La Machine Gosseyn est actuellement nourrie<sup>5</sup> de connaissances technologiques, dans des domaines où la Science officielle n'a que fort peu pénétré : frottements, revêtements de surface, étanchéité. L'objectif est de constituer une Mémoire Technologique, capable d'inférences.

Cette mémoire est nécessairement collective, avec les problèmes d'harmonisation du langage que cela pose. Il n'est pas dans nos intentions d'obliger les Experts à adopter un langage uniforme, ce qui les rebuterait définitivement, mais de détecter les homonymes et les synonymes.

---

<sup>5</sup> par des chercheurs du LISI exclusivement, n'étant pas encore utilisable par des personnes n'en connaissant pas les rouages

Cette mémoire sera utilisée par trois catégories de personnes :

- les experts d'un domaine, qui ne se souviennent plus d'une valeur : on a alors une simple base de données, avec une interface agréable, mais il faut pouvoir répondre, donc détenir beaucoup de connaissances.
- les concepteurs généralistes, qui ne sont vraiment experts que dans au plus un domaine, mais qui doivent tenir compte des autres (le produit à concevoir étant complexe, non réductible à une superposition de fonctions) : il faut pouvoir répondre à leurs questions, mais aussi leur faire des suggestions, voire vérifier leur travail sous différents angles.
- les hommes du terrain, face à un incident, qui cherchent à comprendre le plus vite possible l'origine de l'incident, puis à y trouver un remède. Le rôle de l'interface est alors fondamental : si par exemple le système demande la valeur de tel paramètre, il faut permettre à l'utilisateur de demander "pourquoi tu me demandes ça?", lui répondre "parce que j'en ai besoin pour tel calcul", et admettre qu'il réponde "on n'a pas le temps de faire ce calcul, donne moi un ordre de grandeur".

## Conclusion

Notre but, inavouable dans d'autres colloques, est de mettre en place une structure qui permette d'engranger suffisamment de connaissances pour qu'il en émerge "quelque chose". A tort ou à raison, nous persistons à nous placer dans le cadre de l'Intelligence Artificielle, et non dans celui de la Vie Artificielle, c'est à dire à nous appuyer sur un modèle résolument digital et non analogique (réseaux neuronaux...). Car nous cherchons à ce que le système, après l'émergence éventuelle, puisse nous restituer un modèle. Que ce modèle soit inappliquable aux êtres humains nous importe peu : il nous suffira qu'il permette à une machine de résoudre en temps raisonnable des problèmes complexes.

## Références

- Fouet 87      Fouet, J-M., **Utilisation de connaissances pour améliorer l'utilisation de connaissances : la Machine Gosseyn**, thèse d'Etat, Université Paris 6, Septembre 1987.
- Kornman 91    Kornman, S., **Introspection et Surveillance**, *Actes de RFIA'91*, Lyon, Novembre 1991.
- Montoy 91     Montoy, A., **Auto-amélioration de l'interface homme/machine de la Machine Gosseyn**, mémoire de DEA, Ecole Normale Supérieure de Lyon, Juin 1991.
- Nouira 91     Nouira, R., **Utilisation de connaissances pour l'acquisition de connaissances**, mémoire de DEA, Université Claude Bernard Lyon 1, Octobre 1991.
- Pitrat 90      Pitrat, J., **Métaconnaissance, futur de l'Intelligence Artificielle**, Hermès, Paris, 1990.

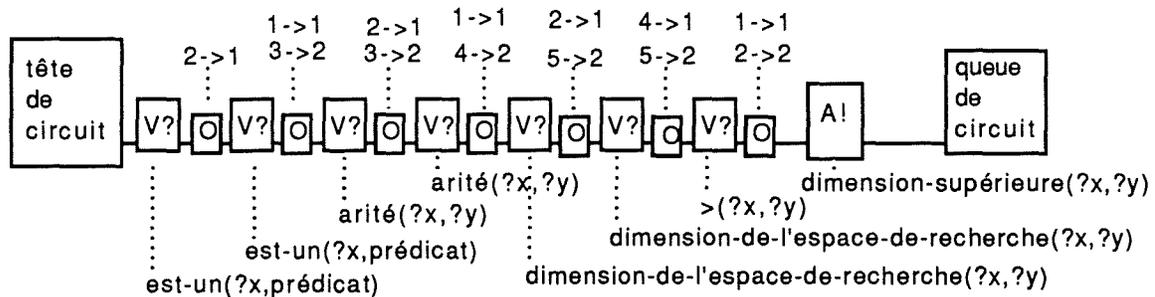
## Annexe 1 : exemple de compilation de règles

Considérons la règle :

"si  $p1$  et  $p2$  sont des prédicats de même arité  $a$  et de dimensions de l'espace de recherche respectivement  $d1$  et  $d2$ , si  $d1$  est supérieure à  $d2$  alors  $p1$  a une dimension de l'espace de recherche supérieure à celle de  $p2$ ".

L'interprétation en chaînage avant de cette règle peut être traduite par le circuit de la figure 1.

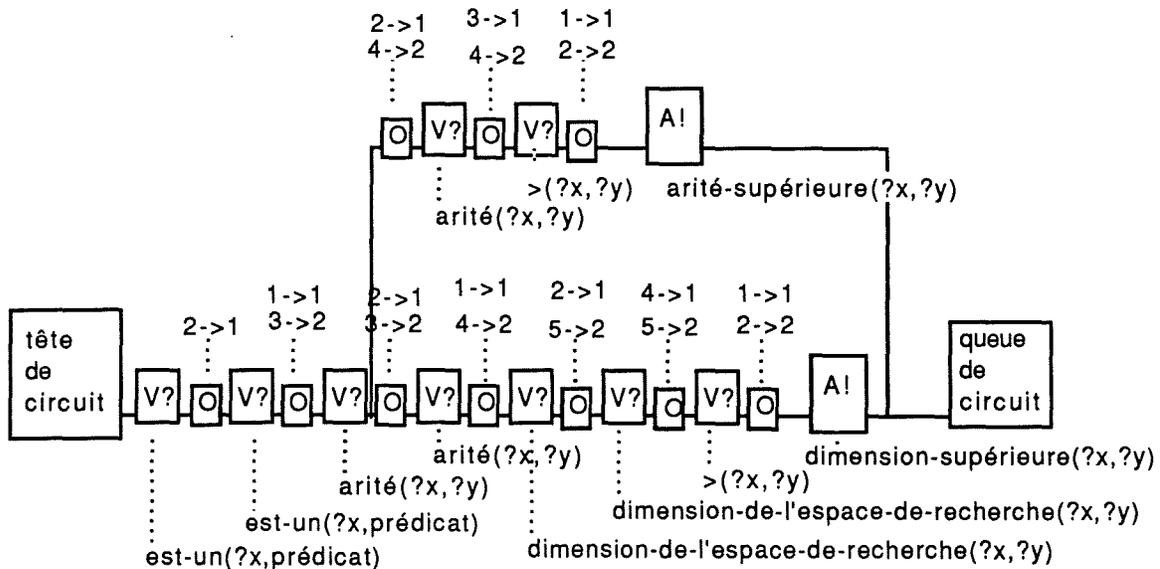
Les  $V?$  sont des processeurs chargés de vérifier chacun un prédicat (indiqué en dessous sur la figure), ré-émettant le n-uplet sur leur sortie inférieure dans le cas favorable, sur leur sortie supérieure sinon. Un n-uplet incomplet à l'entrée peut éventuellement être complété par le  $V?$ . Les  $O$  sont chargés de réorganiser le n-uplet pour qu'il arrive dans le bon ordre (indiqué au dessus sur la figure) au vérificateur.  $A!$  affirme un prédicat.



Si l'on injecte par exemple dans le circuit le n-uplet (homme étudiant ? ? ?), le premier  $V?$  va le laisser sortir parce que homme est un prédicat. Le  $O$  va réorganiser en (étudiant homme ? ? ?) qui va passer avec succès le deuxième  $V?$  parce que étudiant est un prédicat. Le n-uplet (homme étudiant ? ? ?) va successivement devenir (homme 1 étudiant ? ?), traduisant le fait que homme est un prédicat unaire, puis (étudiant 1 homme ? ?), (homme 1000 étudiant 1 ?) s'il y a 1000 objets qui ont la propriété d'être des hommes, (étudiant 50 homme 1000 1) s'il n'y a que 50 étudiants dans la base, et enfin (1000 50 homme étudiant 1) qui va franchir avec succès le dernier vérificateur.

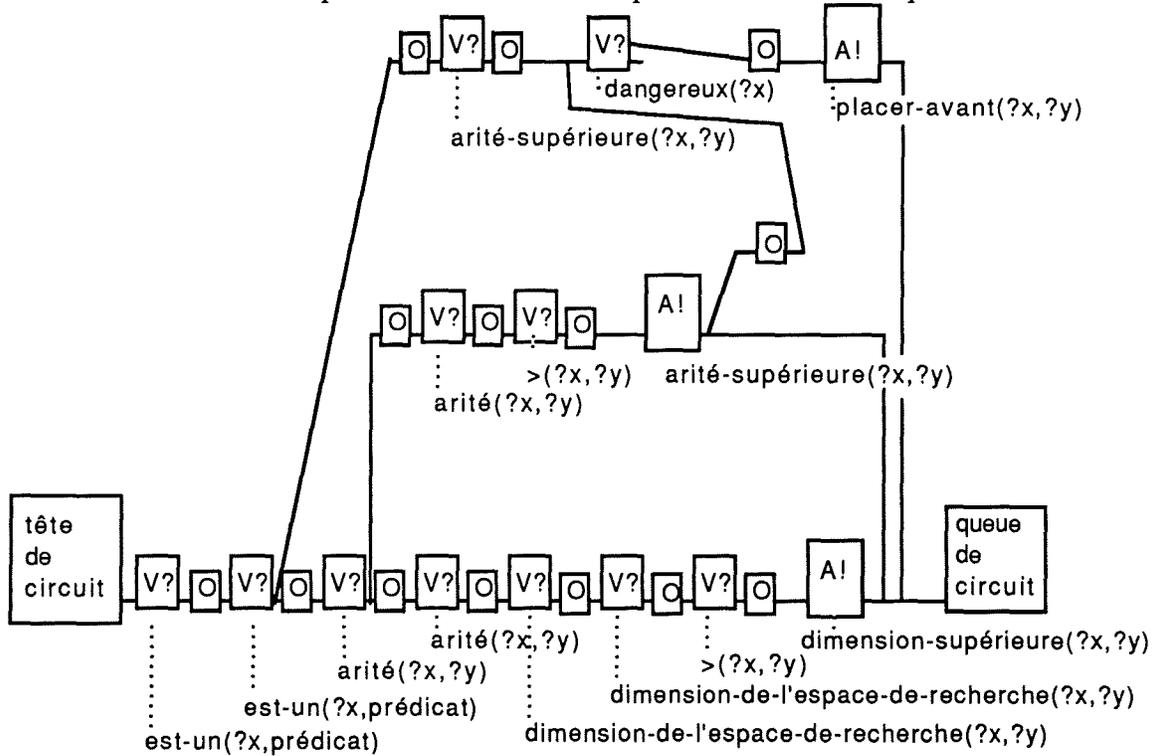
La figure 2 montre comment on greffe sur ce circuit la règle

"si  $p1$  et  $p2$  sont deux prédicats respectivement d'arités  $a1$  et  $a2$ , et si  $a1$  est supérieur à  $a2$ , alors  $p1$  est d'arité supérieure à  $p2$ ".

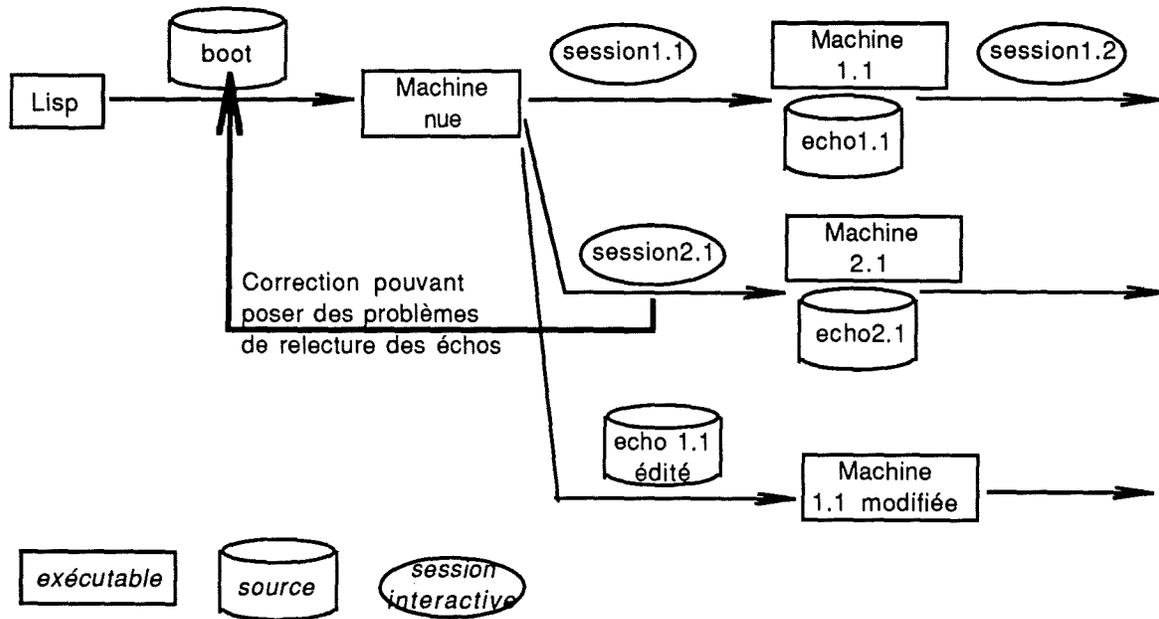


Considérons à présent la règle :  
 "si  $p1$  est d'arité supérieure à celle de  $p2$ , et si  $p1$  est dangereux, il faut placer  $p1$  avant  $p2$ ".

Le circuit de la figure 3 permet de conclure rapidement si l'on sait déjà que l'arité de  $p1$  est supérieure à celle de  $p2$  (branche la plus à gauche), d'établir ce résultat intermédiaire puis de conclure immédiatement sinon (branchement de la sortie de l'affirmateur sur l'entrée du vérificateur). On réalise ainsi "par câblage" la propagation en "profondeur d'abord". Il va sans dire qu'un tel circuit devient rapidement inextricable pour l'oeil.



## Annexe 2 : versions successives, versions parallèles



Journées de Rochebrune  
20-24 Janvier 1992

### Adaptation dynamique d'un système à base de règles d'inférences au problème qu'il doit résoudre

Marc Bardinet

LAFORIA - Université Paris 6:

4, place Jussieu - 75252 Paris

EDF - DER - ER - MOS groupe AISE

1 Av. du Général de Gaulle 92141 Clamart cedex

#### Résumé

Dès qu'il s'agit de résoudre un problème combinatoire complexe de satisfaction de contraintes et tel qu'aucune propagation des contraintes ne soit possible, il devient nécessaire que le système chargé de le résoudre puisse s'y adapter.

Lorsqu'un tel système fonctionne à base de règles, il semble impératif de lui fournir certaines capacités à faire évoluer sa base de règles. On verra qu'il est possible et utile de considérer l'ensemble de ces règles comme une population dont chaque individu est soumis à des lois de génération, de transformation et de disparition.

L'évolution de la base de règles se traduit donc par une évolution de ses individus et par une transformation progressive des lois d'évolution auxquelles ils sont soumis. Cette évolution ayant pour but l'accroissement de l'efficacité de la base de règle.

#### Mots-clés

apprentissage, problème combinatoire, évolution, adaptation.

### 1. Tentative d'analogie entre un ensemble de règles et une population

#### 1.1. Les règles en tant qu'individus faisant partie d'une population

Supposons qu'un système ait pour tâche de résoudre un problème combinatoire complexe. Le système sera d'autant plus apte à résoudre ce problème qu'il sera capable de s'y adapter (au sens "adaptation d'un individu à une situation..."). Lorsque le système fonctionne avec des règles d'inférences on peut formuler cette adaptation de la manière suivante:

- il s'agit de réussir à utiliser les bonnes règles, à générer les plus efficaces, à éliminer ou remplacer les moins efficaces. Il s'agit aussi d'adapter les méthodes de création, de transformation des règles ainsi que les critères utilisés pour les éliminer de manière à ce que les méthodes les plus efficaces soient utilisées.

En quelque sorte, l'adaptation individuelle d'un système à une tâche complexe donnée et fonctionnant avec des règles d'inférence peut être considérée comme une évolution de la population des règles de ce système. En effet, chaque individu de cette population particulière est soumis à un certain

nombre de lois de création, de transformation et d'élimination, ce qui peut être interprété comme une évolution d'une population à travers le renouvellement de ces individus. De même, les lois régissant cette population peuvent elles-mêmes être transformées, ce qui peut être interprété comme une "évolution de l'espèce dont ces règles font partie". Ces lois sont représentées dans le système sous forme de règles et de méthodes associées.

Il semble alors intéressant de considérer la structure informatique de chaque règle d'inférence comme un individu faisant partie d'une population contrainte par un certain nombre de lois et ayant une certaine capacité d'évolution. Cela permet effectivement d'obtenir des bases de règles ayant une certaine autonomie et pourrait s'avérer utile en retour pour ce qui concerne l'aspect Vie-Artificielle [DORM 92].

## 1.2. Les méthodes permettant l'évolution de la population des règles

### 1.2.1. Nécessité d'utiliser des méthodes de transformation liées au domaine

Les méthodes de transformation agissent tant au niveau des individus qu'au niveau de ces méthodes de transformation (niveau "méta"). Pour être efficaces, les méthodes correspondant au premier niveau de transformation sont en fait une instanciation de méthodes générales de généralisation et de spécialisation, appliquées au domaine traité. De même, les méthodes du niveau "méta" agissent sur un certain nombre de paramètres décrivant les méthodes du bas niveau.

Il s'agit en fait de trouver des lois d'évolution acceptables et de faire en sorte qu'elles puissent elles-mêmes être transformées ce qui nécessite l'obtention préalable d'un modèle des règles du domaine ainsi que d'un modèle des règles de transformation. D'autre part, ces lois d'évolution doivent tenir compte de manière importante du domaine. Par exemple, la justification initiale intervenant dans les conditions des règles générées doit avoir un sens par rapport au domaine étudié, être ni trop spécifique, ni trop générale. De même, les méthodes de méta-transformation interviennent pour améliorer les méthodes de transformation dans le cas où elles s'avèreraient peu efficaces, mais il faut, pour que cela soit possible, qu'elles soient pertinentes.

Ainsi, si l'on veut qu'un ensemble de règles puisse évoluer vers une plus grande efficacité en un temps raisonnable il est absolument nécessaire de restreindre de manière significative les formes possibles pour les règles (modèle des règles le plus précis possible) ainsi que les formes possibles de transformation.

### 1.2.2. Evolution possible des méthodes par mise en concurrence

Compte tenu du temps (en nombre de déclenchements) nécessaire pour évaluer une règle (et donc une méthode de transformation de règles) et du fait que pour évaluer une méthode, il faut la comparer à d'autres méthodes, il s'est avéré nécessaire de faire fonctionner de manière concurrente l'ensemble des méthodes existantes. Chaque méthode se voit ainsi attribuer lors de sa création une probabilité initiale d'activation. Pour chaque règle à créer ou à transformer, une méthode est alors choisie aléatoirement en tenant compte de la probabilité de chacune des méthodes d'être activée.

Cette mise en concurrence des méthodes permet de modifier incrémentalement leurs probabilités respectives d'activation en tenant compte de l'estimation de leur efficacité. Une méthode qui aurait tendance à générer des règles trop générales et trop souvent fausses verrait ainsi sa probabilité diminuer progressivement. Le fait que les règles aient une durée de vie limitée permet alors progressivement le renouvellement des règles en utilisant les méthodes considérées comme meilleures.

Ce couplage - mise en concurrence et aspect probabiliste - semble intéressant pour représenter l'évolution des règles. Mais cela n'a de sens que s'il est possible d'évaluer l'efficacité des règles et des méthodes de transformation. Ainsi chaque règle est une structure informatique (représentée sous forme d'objets) dans laquelle se trouvent un certain nombre d'informations telles que:

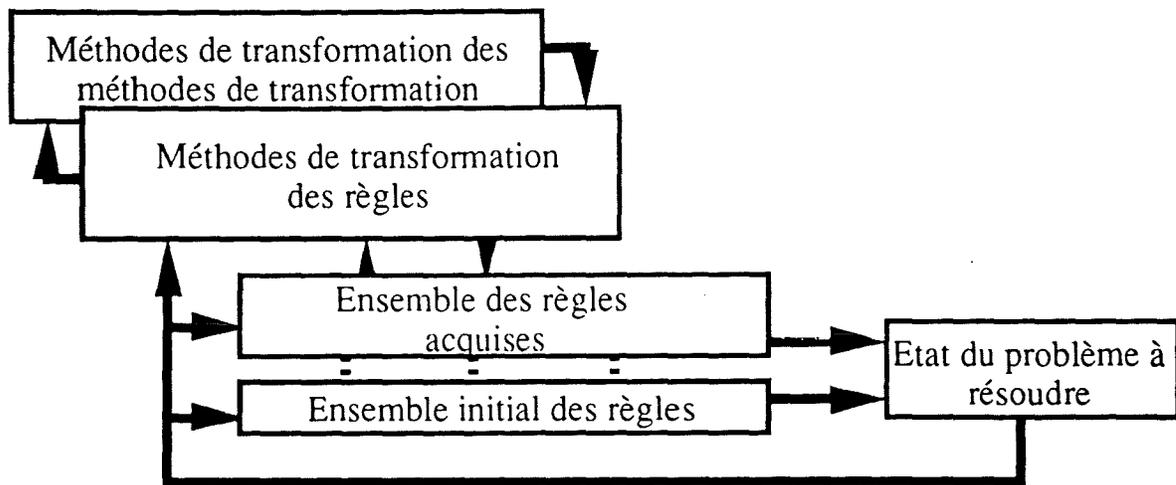
- le nombre de déclenchements de la règle.
- le nombre de déclenchements de la règle avec succès.

- l'age de la règle (en nombre de déclenchements).
- les règles qui la spécialisent.
- la règle qu'elle spécialise.

C'est à partir de ces informations qu'il est possible d'estimer d'une certaine manière l'efficacité d'une règle donnée. L'estimation de l'efficacité d'une méthode donnée tient compte des estimations de l'efficacité des règles qu'elle a générées ou transformées.

Enfin, le système peut générer des méthodes nouvelles de transformation en faisant varier certains paramètres de méthodes existantes, soit d'une manière aléatoire, soit en tenant compte de liens entre les différences d'efficacité de deux méthodes et leur différence par rapport à un paramètre donné.

Voici le schéma de fonctionnement pour un tel système:



## 2. Application à l'obtention de schémas du réseau Très Haute Tension Français vérifiant certaines contraintes

### 2.1. Présentation succincte du réseau Très Haute Tension

Le réseau T.H.T. est composé d'un ensemble de lignes électriques, de groupes produisant de l'énergie, de consommations et de postes. Chaque poste est un sous-ensemble de lignes, de groupes et de consommations dans lequel toute (ou presque toute) configuration topologique peut être construite en reliant ou non chacun de ses éléments avec chacun de ses autres éléments.

On définit un ensemble générique de transitions topologiques élémentaires qui permettent de se déplacer dans l'espace des états possibles pour le réseau.

### 2.2. Présentation rapide du problème à résoudre

On se fixe un plan de production-consommation et un état initial du réseau et on cherche à obtenir un état tel que:

- aucune ligne ne soit surchargée.
- aucune surcharge n'apparaisse, quelque soit la ligne mise hors service (volontairement ou non).

Le problème ainsi posé consiste en fait à chercher un état dans un espace d'états qui en contient potentiellement  $10^{300}$  et tel que chaque état y ait de l'ordre de  $10^3$  voisins. D'autre part ce problème est discontinu et non-convexe ce qui élimine toute tentative de résolution par des méthodes numériques classiques. Enfin, il n'est possible d'évaluer électriquement un état que lorsque celui-ci est totalement instancié ce qui ne permet pas d'utiliser des méthodes de résolution de problèmes combinatoires basées sur la propagation des contraintes telles qu' ALICE [LAU 76]. Une méthodologie qui semble satisfaisante consiste à chercher une suite de transitions qui, à partir d'un état initial donné, aboutisse à une solution.

### 2.3.Nécessité d'une adaptabilité du système en tant qu'individu

Le système de résolution dispose au départ de certaines capacités qui lui permettent:

- de détecter des problèmes électriques.
- de proposer des transitions pour améliorer la situation par rapport à un problème donné.
- de gérer l'arbre de recherche.

Mais ces capacités initiales sont insuffisantes:

- elles sont très lentes et limitées. Mais surtout, elles ne permettent pas, seules, au système de résoudre le problème.
- Elles ne confèrent au système aucun comportement stratégique.

Il a donc été nécessaire de donner au système des capacités d'apprentissage pour augmenter ses chances d'obtenir des solutions au problème posé. En effet, elles lui permettent d'acquérir une expérience utile sur le réseau et ses spécificités.

Des règles d'acquisition, de transformation et d'élimination de règles du domaine permettent une amélioration dynamique du comportement du système en tenant compte des "expériences vécues". Elles s'appliquent différemment pour chaque type de règle du domaine et les transformations des règles dépendent en partie du domaine. Les règles du domaine ainsi générées sont de quatre types:

- Les règles (observations) proposant des observations pour des coefficients électriques.
- Les règles (tactiques) proposant (ou réfutant) des transitions pour améliorer la situation par rapport à un sous-but local donné (influence entre deux lignes du réseau...).
- Les règles (prévisionnelles) proposant des effets d'actions sur des observations. Ces règles permettent d'établir des liens peu évidents a priori entre des actions et des sous-buts.
- Les règles (stratégiques) proposant une transition en indiquant le gain global que l'on peut espérer à plus ou moins long terme (après un certain nombre de transitions). La génération de telles règles permet d'éviter en partie le problème des minima locaux.

Les règles du domaine sont soumises à un certain nombre de lois dont voici les principales:

- Si une information I correcte est générée autrement que par les règles acquises, si cette information est pertinente et si E en est une justification topologico-électrique (sous forme d'une conjonction de faits) alors il faut générer une règle R telle que:  
R: SI E est vérifiée ALORS proposer I.
- Si une information générée par une règle acquise R est correcte alors que R est contrôlée, alors, diminuer la probabilité pour R d'être contrôlée.
- Si une information I générée par une règle acquise R est incorrecte alors, générer une règle R' spécialisant R et générant l'information correcte associée à I.
- Si aucune règle d'un type donné ne se déclenche dans un état E donné, alors, chercher une règle R "quasiment déclenchable dans E" et la généraliser de manière à ce qu'elle devienne déclenchable dans E.
- Si une règle R a un nombre relatif de déclenchements trop faible, alors, généraliser R.
- Si une règle R a un grand nombre de règles la spécialisant alors éliminer R.

## 2.4.Aspect "méta" de l'adaptabilité du système

Si on se fixe des objectifs par rapport à l'efficacité moyenne des règles acquises, il est très probable que les méthodes de transformation initiales ne soient pas optimales. Il s'agit alors de les modifier (c'est le rôle de l'expertise de méta-transformation) de manière à les adapter au problème posé.

Par exemple, si le système considère que le taux moyen de succès par règle est trop faible il doit générer des justifications plus strictes (elles sont à la base de la création des conditions des règles acquises).

D'une manière générale, dans ce système, les méta-transformations n'agissent que sur un nombre restreint de paramètres des méthodes de transformations. Cela dit des changements même faibles au méta-niveau induisent des changements toujours sensibles au niveau des règles du domaine.

## Conclusion

Le système présenté est actuellement réalisé sous forme d'une maquette pour ce qui est des méthodes de transformation des règles du domaine. Il est en phase de test quant à ses capacités à générer et à utiliser des connaissances intéressantes sur son domaine. L'aspect méta-transformation est en phase d'implémentation.

L'élaboration de ce système semble montrer que l'approche Vie-Artificielle dans l'analyse des règles d'inférence permet une amélioration sensible des capacités d'adaptation des systèmes à base de règles.

## Références bibliographiques

- [Bolc Leonard] : Computational Models of Learning. Symbolic computation, Ed. Springer - Verlag.
- [Dormoy & Kornman 92] (à paraître): Metaknowledge, autonomy and (artificial) evolution: some lessons learnt so far. ECAL 1992.
- [de Kleer Johan,1984] : How circuits work. Artificial Intelligence n° 24 (1984), p. 205 - 280.
- [Kuipers B.J.,1984]: Commonsense Reasoning about reality, deriving behaviour from structure. A.I. n° 24 (Amsterdam 84).
- [Laurière Jean Louis,1976] : ALICE, un langage et un programme pour énoncer et résoudre des problèmes combinatoires. Thèse d'état Paris 6, 1976.
- [Lenat Douglas,1982] : The nature of Heuristics. A.I. n° 19 (1982).
- [Mitchell, Carbonell, Michalski,1986] : Machine Learning. Symbolic computation. Springer - Verlag (1986).
- [Pitrat Jacques, 85]: Utilisation des connaissances déclaratives. Ecole Internationale de l'Informatique. AFCET, Publication n°56 du LAFORIA. Université PARIS 6, 1985.
- [Pitrat Jacques, 86]: Le bootstrap sur l'utilisation des connaissances. Cahiers du LAFORIA, n°60. Colloque Intelligence Artificielle, Strasbourg 1986.
- [Simon Herbert A.] : Heuristics for Empirical Discovering. Dans : Computational Models of Learning, Bolc Leonard, Ed. Springer-Verlag.
- [Singer Daniel,1984] : Contribution à l'expression logique des mécanismes d'apprentissage. Thèse Paris 6 (84).
- [Winston Patrick,83] : Learning structural descriptions : Ch. 3, Dans : Machine Learning for Expert Systems.

# LA CONSTRUCTION DE SOUS-BUTS LORS D'UNE TACHE DE DECOUVERTE PROCEDURALE F.ASCHEHOUG<sup>1</sup>

## **Introduction**

Le texte qui suit porte sur l'apprentissage par la découverte de connaissances procédurales. Nous cherchons à expliquer le processus de construction de sous-buts lors d'une situation d'apprentissage par la découverte d'une procédure.

La méthode utilisée est celle de l'interprétation de protocoles individuels (Ericson & Simon 1984, Richard, 1990, Vanlehn, 1983, 1988a, 1988b) venus de situation d'apprentissage par la découverte telles qu'elles sont définies par Schragar (1985).

L'idée que nous voulons promouvoir, ici, est que la construction de l'interprétation de la situation répond à deux principes complémentaires.

Un premier principe d'unité que l'on peut énoncer comme suit: au sein d'une même interprétation une exigence est de ne pas retenir d'éléments incompatibles entre eux. Il en découle que si ce cas apparaît, par la découverte d'une incompatibilité, une modification de l'interprétation est exigée ou bien l'élément à l'origine de l'incompatibilité est rejetée de la structure interprétative afin de maintenir une unité de signification à l'interprétation. Les modifications des éléments se divisent en deux. Il existe des modifications mineures que l'on appellera des retouches interprétatives et des modifications, non plus mineures, caractérisées par le fait qu'elles exigent une réorganisation de l'ensemble des éléments; on les qualifiera de majeures.

Un second principe qualifié de pragmatique qui s'énonce comme suit: l'interprétation construite doit avoir la propriété d'être un foyer susceptible d'engendrer des sous-buts. Ceux-ci sont considérés comme des micro-unités interprétatives qui assurent une progression vers l'état visé par l'agent. Ces unités assurent une fragmentation du problème en une série de problèmes. Bien sur les sous-buts n'épuisent pas le contenu de l'interprétation, mais ils sont des éléments centraux dans la mesure où, dans un apprentissage procédural, il s'agit d'apprendre à engendrer un objet et non pas seulement d'apprendre ce qu'est un objet. Pour marquer ce rapport étroit à l'action, on qualifiera les sous-buts comme des micro-unités interprétatives pragmatiques [M.U.I.P].

Ces principes font comprendre ce que l'on constate si l'on demande à un sujet de découvrir une procédure par la découverte.

Le but de la partie résultats de ce texte est d'examiner si les phénomènes observés, par nous, s'accordent avec les deux principes mentionnés ci-dessus. S'il en est ainsi, on aura avancé d'un cran dans la compréhension des mécanismes de construction de sous-buts. On verra que les données présentées dans cette partie, si elles ne permettent pas de corroborer statistiquement les hypothèses, nous autorisent toutefois à les sauvegarder.

## **Mouvement théorique d'inscription de la recherche**

Bien que ce ne soit pas le lieu dans ce texte de se lancer dans une présentation même sommaire du mouvement théorique dans lequel on s'inscrit, on peut fixer les auteurs majeurs qui participent à son élaboration. On retiendra Anderson (1983, 1987), Anzai

---

<sup>1</sup> Université René Descartes, U.F.R. de Psychologie, 28 Rue Serpente 75006 Paris.

(1984, 1987), Anzai et Simon (1979), Catrambone & Holyak (1988), Klahr & Dunbar, (1988), Schrag, (1985). A des degrés divers, ces auteurs sont préoccupés par la question de savoir comment se constitue, par la découverte, une interprétation fonctionnelle de la situation. Il en découle un débat en termes psychologiques autour de la notion de sous-but. Dans ce débat, on cherche à expliquer les mécanismes de construction de sous-but.

## **I. La recherche**

Afin de se rapprocher de ce que l'on cherche, on a proposé à huit sujets de résoudre un problème d'assemblage sans recourir à la notice d'assemblage de l'objet en question. Cette contrainte avait pour objectif de placer les sujets en situation de découverte procédurale.

La description de la tâche a été conduite en vue d'une analyse de l'activité en termes de découverte de propriétés d'objets. Dans le présent texte, il est indiqué une version abrégée de cette analyse. Mais les propriétés omises ne sont pas pertinentes pour comprendre les énoncés relatifs aux résultats mis en relief dans ce texte. Ainsi les propriétés listées, ici, permettent de saisir la logique d'assemblage du dispositif. Toutefois si le but est de lire l'analyse complète, on se reportera à la référence Aschehoug (1989).

L'objet qu'il s'agit d'assembler est un dispositif électronique appelé "automate programmable". Il est constitué de 36 éléments qui se distribuent dans les 7 catégories suivantes:

- 9 cartes électroniques (largeurs différentes) qui ont comme partie des prises de connection;
- 8 boîtiers métalliques avec des ouvertures (largeurs différentes);
- 8 grilles de protection (toutes identiques);
- 3 plaquettes électroniques (tailles différentes);
- 2 supports qui ont comme parties des prises de connection;
- 3 câbles de raccordement.
- 3 caches.

Les propriétés sélectionnées pour la version abrégée de l'analyse de la tâche sont énumérées ci-dessous. Signalons que, dans cette énumération, les identificateurs alphanumériques ont été construits, par nous, avant tout pour faciliter l'analyse des protocoles d'observation. Si bien que l'ordre introduit par le code numérique doit être considéré comme non pertinent au plan de l'exécution de la tâche.

Les propriétés

p1: les cartes se mettent dans les boîtiers;

p1.1: les cartes avec une prise se mettent dans les boîtiers à une ouverture

p1.2: la carte avec deux prises se met dans le boîtier à deux ouvertures

p1.3: la carte avec trois prises se met dans le grand boîtier

p2 : le boîtier le plus large reçoit des cartes spécifiques;

p3: les prises des cartes doivent être connectées avec les prises des supports;

p4: les grilles se mettent dans les boîtiers;

p5: les grilles se mettent dans les boîtiers avant les cartes;

p6: les boîtiers se mettent sur les supports;

p7: les plaquettes se mettent sur les cartes;

p8: les plaquettes se mettent sur les cartes avant de mettre les cartes dans les boîtiers

p9: les plaquettes se mettent sur des cartes spécifiques

p10: les câbles se fixent sur les supports.

Huit sujets ont participé à l'épreuve. Quatre sujets qui "ont une connaissance" du fonctionnement du dispositif et quatre sujets "sans connaissance" du fonctionnement. On exige des sujets de "penser à voix haute".

## **II. Résultats**

*Préambule: méthode d'analyse des protocoles<sup>2</sup> de résolution*

### **Identification des sous-but**

La procédure d'identification des sous-but est fondée sur deux étapes. La première vise à distinguer deux espèces de sous-but. La première espèce sont ceux des sous-but identifiés à partir des segments de verbalisations. Les marques verbales distinctives considérées sont des prédicats C'est par exemple le segment suivant de verbalisation "*bon je vais mettre les cartes dans les logements*". Sur cet extrait, on identifie le sous-but à partir de l'apparition de la séquence "mettre les cartes...." qu'on pourrait écrire.

Les seconds sous-but sont identifiés à partir des actions réalisées dans le cas où le sujet fait quelque chose sans manifester de verbalisation. Pour ces cas, nous avons considéré que lorsque le sujet réalise un assemblage sans le défaire immédiatement il s'agissait d'un sous-but. Par exemple, le sujet assemble une carte et un logement sans que l'on puisse rattacher ces actions à un segment de verbalisation. Dans ce cas, j'ai considéré que l'état final instancié par la suite d'actions réalisées était le sous-but visé par le sujet.

La seconde étape nous a permis d' identifier la chronologie de traitement de chaque sous-but déclarés. Pour ce faire, nous avons examiné les actions proches du sous-but afin d'identifier le début et la fin du traitement de chacun des sous-but. Cette phase nous a permis d'être en mesure de différencier des configurations d'activités de traitement des sous-but. Il apparaît nécessaire pour l'analyse de disjoindre le moment d'apparition du sous-but dans le protocole et le moment où l'on peut considérer le sous-but réalisé.

Conjointement à l' identification des sous-but et de leurs propriétés, nous avons noté, pour chaque sujet, l'ordre selon lequel sont réalisées les découvertes afin d'être en mesure de relier la découverte d'une propriété à la production des sous-but. Ce faisant, on cherchait à déterminer si les phénomènes observés s'accordaient avec les principes énoncés en introduction.

### **II.I La description des phénomènes d'exploration**

#### *a) La construction de la première interprétation*

##### **Phénomène**

La première interprétation construite est élaborée à partir des propriétés découvertes lors d'une phase initiale d'exploration. Aucun des huit sujets n'a évoqué l'ensemble des relations entre éléments avant de commencer le premier montage. Les propriétés évoquées communes aux huit sujets pour construire le premier réseau sont:

- p 3: la relation entre les prises des cartes et les prises des supports;
- p6: la relation entre les boîtiers et les supports;
- p7: la relation entre les plaquettes et les cartes;
- p8: la relation entre les câbles et les supports.

<sup>2</sup> Les huit protocoles de résolution sont disponibles sur demande adressée à l'auteur.

## Interprétation

### *b) Le rôle des connaissances préexistantes relatives aux parties de l'objet*

#### Phénomène

L'activité d'exploration présente une allure systématique chez les sujets qui disposent en mémoire des connaissances relatives à la structure fonctionnelle du dispositif. Cela se traduit par une recherche des parties fonctionnelles spécifiques. Au plan des phénomènes verbaux, on constate que le sujet annonce préalablement à l'exploration la partie de l'objet dont il veut s'assurer l'existence dans le matériel fourni. Ce phénomène se traduit par de longues durées d'exploration initiales relativement aux durées observées chez les sujets sans connaissance préexistante sur le dispositif.

#### Interprétation

Nous interprétons ces phénomènes de la manière suivante: un aspect de l'activité consiste à récupérer de façon automatique un plan d'exploration à partir de l'activation en mémoire d'un modèle de l'objet. Une des caractéristiques de ce modèle d'objet est d'être fondé sur une décomposition en parties. Dès lors l'activité d'exploration est avant tout un mode particularisation des connaissances préexistantes en mémoire.

### *c) Les marques verbales de l'activité d'inférence*

Si on admet que les marques verbales sont des reflets valides de l'activité interne d'inférence, il apparaît une deux classes de phénomènes inférentiels. La première est celle qui consiste à inférer la fonction de l'élément. La seconde espèce consiste à inférer le moment de montage d'un élément. Dans les cas, où a été observée une telle inférence, le schéma d'inférence suit le chemin suivant: ce qui est inférer c'est tout d'abord la fonction de l'élément ET PUIS il en découle l'inférence d'un moment de montage. Un exemple de marque verbale est fourni par l'occurrence de la chaîne verbale "c'est un cache donc ça se met à la fin". On a là une inférence à deux crans. Un cran fonctionnel probablement par catégorisation suivi à d'un cran temporel dont l'origine est, pour nous, plus opaque.

## II.III Les sous-buts produits

### *a) Classes de sous-buts*

#### Phénomène

L'observation des protocoles fait apparaître au cours de la réalisation de la tâche deux classes de sous-buts. La première classe [C1] contient l'ensemble des sous-buts dont l'état résultant du traitement fait partie de l'état solution. Ce sont les sous-buts d'appariement d'une pièce avec une autre et les sous-buts de maintien des relations d'appariement.

La deuxième classe [C2] concerne les sous-buts liés à la nécessité de construire une interprétation de la situation qui rende possible l'engendrement de sous-buts de la première classe. Les sous-buts de cette classe apparus sont les suivants:

- 1° regrouper spatialement des éléments ayant une propriété commune;
- 2° dénombrer des éléments;
- 3° défaire une relation physique existante;
- 4° tester une hypothèse relation;
- 5° disjoindre spatialement un élément.

Les occurrences de cette classe de sous-buts se répartissent tout au long des protocoles même si l'on constate une diminution au fur et à mesure que l'on se rapproche du terme du protocole.

### Interprétation

La construction de l'interprétation de la tâche suit un processus graduel. Le caractère dynamique du processus est assuré par l'engendrement de sous-but de la classe [2]. Les sous-buts de cette classe [1] permettent d'enrichir l'interprétation pragmatique de la tâche de sorte que celle-ci ne contienne pas d'éléments en contradiction. Le second principe exerce ainsi une influence sur la sélection des propriétés apparues par l'exécution des sous-buts de la classe [2].

#### *b) La cohérence entre les propriétés découvertes et les sous-buts construits*

L'examen des sous-buts de montage qui suivent les phases d'exploration ou les occurrences de sous-buts de la classe [2] fait apparaître que les sous-buts de la classe [1] en question s'accordent avec les propriétés découvertes avant leur production.

Cette constatation va dans le sens d'une activité de découverte se déroulant du point de vue de l'activité de construction des relations entre éléments comme une construction progressive du réseau de relations entre les éléments du kit, et ceci à partir du premier réseau de relations construit. On peut y voir un élément en faveur du principe pragmatique de construction de l'interprétation.

#### *c) Les modifications de l'interprétation*

On constate sur chaque protocole que les sujets s'autorisent à défaire une relation établie. Ces actions permettent d'identifier les moments où le sujet modifie le réseau des relations entre éléments. C'est généralement suite à la prise en compte d'une nouvelle propriété incompatible avec l'interprétation construite que le sujet décide de défaire une relation constituée antérieurement à cette découverte.

L'étude minutieuse des "retours en arrière"; fait apparaître une division en trois classes:

- 1° - pour satisfaire les contraintes d'appariement sur les bases de montage;
- 2° - pour prendre en compte une précondition découverte et intercaler un sous-but dans le montage d'un sous-ensemble;
- 3° - pour faciliter l'appariement d'une pièce sur une base de montage.

La classe des retours arrière concernant la prise en compte d'une précondition ne ruine pas nos principes de construction. Mais ils obligent à considérer séparément les processus de découverte des propriétés des objets et les processus de maintien en mémoire des propriétés découverte.

### **III. Conclusion**

*Rappel:* Le présent texte présente les phénomènes d'apprentissage observés lors d'une tâche de découverte procédurale. Y sont attachées les interprétations construites pas nous pour en rendre compte. Deux principes nous ont guidé dans ce travail interprétatif. Un premier principe dit d'unité qui avance des conditions de maintien d'une propriété au sein d'une interprétation. Un second principe dit pragmatique s'ajoute au premier à fin de permettre à l'agent d'engendrer des sous-buts qui assurent, de proche en proche, la réalisation du but premier.

*Prolongement:* D'un point de vue plus général, l'étude de l'activité inférentielle lors de résolution de problème apporte un éclairage original sur les mécanismes de construction de l'interprétation de la situation et de ses rapports avec la construction de sous-butts.

### Références bibliographiques

ANDERSON, J.R. (1987) Skill acquisition: compilation of weak-method problem solutions, Psychological Review, 94, 192-210.

ANDERSON, J.R. (1983) The architecture of cognition, Cambridge, MA: Harvard University Press.

ANZAI, Y., & SIMON, H. (1979) The theory of learning by doing, Psychological Review, 86, 124-140.

ANZAI, Y. (1987) Doing, understanding, and learning in problem solving, In D. Klahr, P. Langley, R. Neches (Edit), Production system models of learning and development, Cambridge, Mass: MIT Press, 55-97.

ANZAI, Y. (1984) Cognitive Control of Real-Time Event-Driven Systems, Cognitive Science, 8, 221-254.

ASCHEHOUG, F. (1989) Raisonnements et construction de sous-butts lors d'apprentissages par la découverte. Thèse de Doctorat Université Paris 5/I.N.R.I.A.

CATRAMBONE, R., & HOLYAK, K.J. (1988) Learning subgoals and methods for solving problems, The tenth annual conference of the cognitive science society, 153-159.

ERIKSSON, K.A., & SIMON, H.A. (1984) Protocol analysis: verbal reports as data, Cambridge, M.I.T. Press.

KLAHR, D., DUNBAR K. (1988) Dual search during scientific reasoning, Cognitive Science, 12, (1), 1-48.

RICHARD, J.F. (1990) Les activités mentales: comprendre, raisonner, trouver des solutions, Armand Colin.

SHRAGER, J. C. (1985) Instructionless learning : discovery of the mental model of a complex device, PH.D. Department of Psychology Carnegie Mellon.

VANLEHN, K. (1988a) Toward a theory of impasse-driven learning, In H. Mandl & A. Lesgold (Eds) Learning issues for intelligent tutoring systems, New York: Springer, 19-41.

VANLEHN, K. (1988b) Learning events in the acquisition of three skills, In G. Ohlson & E.Smith, (Eds) Proceedings of the Eleventh Annual Conference of the Cognitive Science Society. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

VANLEHN, K. (1983) Human procedural skill acquisition; theory, model, and psychological validation, Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, Washington, D.C.79-85.

# L'adaptation dans les environnements d'apprentissage en Mathématiques

Madame Dominique GUIN

---

*Résumé : Nous présenterons tout d'abord l'un des tutoriels intelligents les plus fréquemment cités dans les ouvrages récents d'Intelligence Artificielle où il est souvent présenté comme un "modèle" du genre. Une difficulté majeure lors de l'utilisation éventuelle de ce tuteur dans une classe provient de son absence d'adaptation, d'où la nécessité de prévoir une capacité d'adaptation de tels systèmes dès leur conception. Nous présenterons ensuite quelques environnements informatiques d'apprentissage en Mathématiques dans lesquels l'on observe une tentative réelle d'intégrer une possibilité d'adaptation.*

---

## I. Un tuteur basé sur une théorie cognitive

Après l'élaboration d'une théorie générale de la cognition ACT\*, J.R. Anderson s'est intéressé à la conception de tutoriels intelligents simultanément pour appliquer cette théorie et valider ses hypothèses. Les principes de cette théorie sont exposés en détails dans [Anderson & al 87]. Puisque nous nous intéressons à l'adaptation, nous signalerons plus particulièrement les deux derniers principes de cette théorie :

*Principe 7 : Adapter l'enseignement à l'expertise de l'élève.*

*Principe 8 : Faciliter la résolution par approximations successives.*

Un principe important de la théorie ACT\* est la réaction immédiate aux "erreurs" (*Principe 6*) : il n'est pas possible de s'éloigner trop d'un chemin de preuve, même si les règles appliquées sont correctes. C'est le paradigme de la modélisation par la trace : l'analyse du comportement de l'élève se fait par comparaison avec le modèle idéal et le modèle erroné (Ideal Buggy Rules).

Geometry Tutor autorise plusieurs solutions pour résoudre un exercice. Cependant, la règle proposée doit appartenir aux règles prévues pour résoudre cet exercice et la solution proposée ne doit pas s'*éloigner* de plus d'un *pas* de déduction du graphe prévu. Or, dans la plupart des cas, un pas d'éloignement ne suffit pas pour proposer une autre solution correcte. Geometry Tutor refuse donc certaines *applications correctes* de règles qui conduisent à une solution parfaitement correcte parce qu'elle s'éloigne de plus d'un pas du modèle IBR [Guin & Groupe IA 91, p 27]. Il est alors très gênant que le logiciel ne fournisse pas, au moins, un message d'aide qui signale à l'utilisateur qu'il ne s'est peut-être pas trompé : pour que l'élève progresse, il doit comprendre la nature de l'erreur. C'est d'autant plus vrai lorsque "l'erreur" consiste à ne pas travailler dans le contexte souhaité : il s'agit ici du *contrat didactique*<sup>1</sup> qui n'est pas clairement explicité.

Comme J.R. Anderson le reconnaît lui-même [Anderson & al 87], Geometry Tutor ne respecte pas le principe 7 car le système impose une démarche de *pas à pas* : l'élève expert doit travailler comme le novice. Lors de l'utilisation de Lisp Tutor qui s'appuie également sur la théorie cognitive ACT\*, J.R. Anderson confirme que les élèves novices sont moins gênés par la directivité du système (principe 6), mais que ceux qui ont déjà une expérience de la programmation se montrent plus impatientes. Il pense que le logiciel devrait pouvoir s'adapter au niveau de l'élève (principe 7) en combinant des règles primitives du modèle idéal, mais nous verrons dans le paragraphe suivant qu'à notre avis la compétence de l'expert ne se résume pas à savoir combiner les règles. Elle consiste également à comprendre les *raisons* des liens résumés par les règles, à imaginer les étapes d'un plan de démonstration en fonction du contexte et à donner les *grandes lignes* d'une démonstration avant d'entrer dans les détails. Ainsi, il nous semble que, lorsque l'expertise grandit, le principe 6 devrait être abandonné, ne serait-ce que pour pouvoir prendre en compte le principe 8 : une résolution par approximations successives est difficilement compatible avec une réaction immédiate aux erreurs. Il apparaît donc que même lorsque la conception de l'environnement d'apprentissage est basée sur une théorie cognitive, il est difficile, lors de l'élaboration concrète de respecter ses principes : c'est le cas ici pour le principe d'adaptation.

## II Que peut être la capacité d'adaptation dans le domaine du raisonnement géométrique ?

Dans le domaine du raisonnement géométrique, il faut tout d'abord distinguer l'*organisation déductive* [Guin 90] (comprendre les règles du jeu, les connaissances

---

<sup>1</sup> Etude des liens entre enseignant et élève qui déterminent, de façon très souvent implicite, le rôle de chacun et sont susceptibles d'affecter le produit de l'apprentissage.

opératoires telles que savoir appliquer un théorème) et la découverte de la démonstration. La démarche imposée de *pas à pas* est souvent un obstacle à la découverte de la démonstration géométrique. Une approche trop *atomisée* tend à faire perdre le "fil directeur". De plus, la démonstration géométrique n'est pas forcément une combinaison de marche avant et arrière, la *reconnaissance d'un plan* ou d'une *figure prototype* [Guin 90] doit être prise en compte : l'élève doit pouvoir évoluer dans sa démarche et ne plus travailler comme un novice. Un *plan* est ici une façon schématique d'anticiper l'action, de la guider, de pouvoir poser des jalons. L'*incomplétude* fondamentale des plans est une condition nécessaire de leur efficacité : l'élève doit avoir la possibilité de tester un plan pour comprendre *pourquoi* il échoue afin de l'améliorer : les raisons de l'échec seront alors utilisées pour modifier le plan initial. Pour une mise au point de la démonstration, il est nécessaire de pouvoir choisir le niveau auquel on travaille et de pouvoir procéder par *approximations successives*, méthode aux antipodes d'une réaction immédiate aux erreurs. Le système doit donc pouvoir s'adapter à une telle démarche.

La théorie ACT\* fait l'hypothèse implicite que la connaissance déclarative cesse de jouer un rôle dans les savoir-faire après le stade novice et n'est pas modifiée tout au long du développement de l'expertise : il nous semble qu'elle *évolue* simultanément avec les méthodes puisque ces dernières dépendent des représentations. Un élève ayant de bonnes compétences (qui peuvent être contrôlées) dues à l'acquisition de méthodes valables dans un certain domaine, peut se trouver complètement démuné si l'on étend ou si l'on modifie légèrement l'approche de ce domaine. L'aptitude au *changement* de représentations fait partie de l'expertise mathématique, c'est un des objectifs de l'enseignement des mathématiques que d'*entraîner* l'élève à ces changements de représentations en fonction du *contexte* adapté à la résolution. Il est donc souhaitable d'exprimer cet *enrichissement* du champ conceptuel<sup>1</sup> en explicitant le passage d'une représentation à l'autre, ce qui permet de prendre en compte la diversité des signifiants ; c'est la démarche développée dans [Guin 91-2]. En outre, certains signifiants permettent un accès plus aisé que d'autres à la représentation du problème. La modification de l'*encodage linguistique* influe de manière significative sur les performances des élèves, il est donc important de pouvoir expliciter les changements de représentations.

La description explicite du champ conceptuel doit par conséquent prendre en compte le *développement* des concepts chez les élèves [Guin 91-1] qui induiront successivement différents *schèmes*<sup>2</sup>. Plusieurs *niveaux* de connaissance doivent être représentés dans le système depuis celui de l'élève débutant jusqu'à celui de l'élève

<sup>1</sup> La notion de *champ conceptuel* regroupe les éléments intervenant dans la signification d'un concept : l'ensemble des problèmes, des procédures qui sont les outils pour la résolution de ces problèmes, des signifiants pour la description des problèmes et des procédures [Vergnaud 90].

<sup>2</sup> L'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations donnée [Vergnaud 90].

"expert" ou "idéal" <sup>1</sup>, car ces différents niveaux conduisent à différentes procédures de résolution. Les environnements d'apprentissage doivent refléter les différentes *étapes* du *développement* cognitif.

En particulier, quand cela est possible, le système doit intégrer une description explicite des *schèmes*, en termes de connaissances opératoires [Guin 91-2] (mise en évidence d'*invariants opératoires* <sup>2</sup> tels que les *théorèmes-en-acte* <sup>3</sup>, de changements de représentations). Dans le cas contraire, le système doit contenir une modélisation de la *conceptualisation* des connaissances *implicites* telles que "on voit que" [Bruillard 91], ainsi que les conduites *métacognitives* de l'élève "expert" : les heuristiques de contrôle (générales) pour piloter et superviser le processus de résolution, les heuristiques de sélection d'une méthode (spécifiques au domaine), la mise en évidence de *méthodes* ou de *plans* qui *guident* la résolution, permettent de se rapprocher progressivement d'une solution, et induisent des procédures de résolution par approximations successives.

J. Pitrat a montré la nécessité d'intégrer dans les systèmes capables d'apprentissage des *métaconnaissances*, parce qu'elles sont indispensables à l'acquisition et l'utilisation des connaissances [Pitrat 90], et permettent l'*adaptation* à une situation nouvelle. En outre, la métaconnaissance doit s'appliquer à elle-même pour s'améliorer (de manière analogue à l'expert qui, contrairement au novice, consacre un temps certain au *contrôle* de ces processus cognitifs). Métaconnaissances et *réflexivité* sont donc des ingrédients indispensables aux systèmes capables d'apprentissage, mais également aux environnements d'apprentissage capables d'adaptation et d'explication. Nous verrons dans le paragraphe suivant que certains systèmes commencent réellement à intégrer de telles métaconnaissances.

### III Environnements d'apprentissages ayant une capacité d'adaptation

*Amalia* : M. Vivet a conçu un système de calcul de primitives en privilégiant les aspects concernant l'*explication* (trace-commentaire-justification) et l'*expertise pédagogique*. Il introduit la *flexibilité* dans son système grâce à des *métarègles*, qui sont des métaconnaissances sous forme déclarative et permettent d'élaborer, de choisir un plan, et d'exprimer des règles *pédagogiques* pour le choix d'une tâche adaptée à l'élève, d'une stratégie pédagogique en fonction de son niveau, ou pour la *mise à jour* du modèle de l'élève en tenant compte des réussites et des échecs de la session [Vivet & al 88].

<sup>1</sup> Au sens de J. R. Anderson : expliciter comment l'élève "idéal" devrait se comporter.

<sup>2</sup> Notion due à J. Piaget : les objets, propriétés relations et processus que la pensée découpe dans le réel pour organiser l'action.

<sup>3</sup> Sans être capables de les formuler, les enfants utilisent des "théorèmes". La reconnaissance d'un théorème-en-acte détermine le choix de la procédure de résolution [Vergnaud 90].

**Aplusix** : J.-F. Nicaud [Nicaud & al 90] introduit le concept de *profil* de l'élève. Chaque concept sur les manipulations algébriques (factorisation, équations ...) possède plusieurs attributs (connu, employé, choisi, combiné ...) qui prennent leurs valeurs dans {t. faible, faible, médiocre, moyen, assez-bien, bien, t. bien}. En outre, les connaissances *opératoires*, les reconnaissances d'expressions et les *heuristiques* sont différentes selon le profil de l'élève (débutant, moyen ou expert). Ce prototype est *paramétrable* au niveau des connaissances manipulées par l'intermédiaire du profil de référence, ce qui permet ainsi de développer une explication et une résolution adaptées au niveau de l'élève se traduisant par exemple dans la *granularité* du raisonnement. Un nouveau modèle de raisonnement et un mécanisme d'*évaluation progressive* de la connaissance introduits récemment produisent un raisonnement plus proche du raisonnement humain grâce à la notion de *plan* (total, partiel, sûr, incertain, divisible). La *qualité* d'un plan est définie en fonction des heuristiques appliquées dans ce plan, ce qui permet de déterminer le meilleur plan à appliquer [Saïdi 90].

**Cabri-Géomètre** : Dans Cabri-géomètre, dont l'objet est la construction de figures géométriques planes, l'accent est mis sur une caractéristique fondamentale du micro-monde : *extensibilité* et *adaptabilité* [Baulac & Laborde 89]. Cabri-géomètre donne donc la possibilité d'une part d'interdire l'accès à certains outils non maîtrisés, et d'autre part propose des outils plus élaborés tels que les *macro-constructions* et les *macro-calculs*. En outre, Cabri-géomètre peut répondre à des questions posées par l'élève portant sur la *vérité* de certaines propriétés, et fournir un contre-exemple *adapté* à la construction préalablement effectuée par l'élève, c'est-à-dire *visuellement* significatif en modifiant le dernier constituant de la construction.

**Elise** : Le projet Elise fait partie du projet Amalia [Delozanne E. & al 89]. La base de connaissances est organisée en quatre niveaux : connaissance de base, techniques, stratégiques, contrôle du processus de résolution. Différentes *méthodes* sont proposées pour résoudre le problème selon le niveau. Deux modalités sont implémentées : *consultation* (l'étudiant choisit le niveau) et *résolution* (l'étudiant a l'initiative pour proposer un *plan* et peut demander une aide adaptée).

**Mentionezh** : Dans le projet de Rennes, D. Py s'attache à réaliser un système qui prenne en compte une approche plus *globale* de la démonstration géométrique. Plus particulièrement, le rôle du tuteur consiste à essayer au cours de la session à partir des éléments de preuve déjà fournis de *reconnaître l'intention* de l'élève, c'est-à-dire parmi les démonstrations possibles, celle qui se rapproche le plus de celle entreprise par l'élève : il s'agit de détecter le plan et la démonstration *visée* [Py 90].

**Naiade** : La conception de cet environnement d'apprentissage du calcul algébrique repose sur une expérimentation (psychologie cognitive & didactique) qui met en évidence la démarche *locale*, l'importance du *contexte* chez le novice, et la *reconnaissance morphologique* d'une expression. Naiade offre la possibilité de *s'adapter* à la *progression* de l'élève, de lui fournir l'explication au niveau de *détails* choisi par ce dernier pour

résoudre le problème grâce à l'introduction d'un niveau associé à chaque action primitive [Cauzinille-Marmèche & al 89].

***Un système qui apprend*** : L'apprentissage est conçu comme le passage *progressif* d'un *méta-expert* en résolution de problèmes à un état *expert* en résolution de problèmes d'un domaine (ici, la démonstration géométrique). Le système *analyse* sa solution, et *détecte* à partir des sous-graphes intéressants, des méthodes et prototypes [Pintado 91]. Le fonctionnement de base du résolveur est une coopération entre les deux activités suivantes : reconnaissance de *prototypes* et déclenchement des déductions associées, recherche d'un sous-but adapté à la situation courante. La nature du système lui permet de s'adapter au degré d'expertise de l'utilisateur.

## V Conclusion

Le développement d'une *explication* parfaitement adaptée dans les environnements d'apprentissage nécessite d'y intégrer une modélisation *dynamique* des connaissances, de modéliser précisément le champ conceptuel du domaine et son *évolution* (mise en évidence d'invariants opératoires, de méthodes, de plans etc.) au cours de l'apprentissage ainsi que les conduites *métacognitives* de l'élève expert. L'idéal serait de concevoir des systèmes *paramétrables* par l'enseignant permettant de modifier le comportement du tuteur afin de pouvoir véritablement l'adapter à l'utilisateur.

## Références

- [Anderson & al 87] Anderson J.R., Boyle C.F., Farell R., Reiser B.J., *Cognitive principles in the design of computer tutors*, Modelling Cognition, Ed P. Morris, John Wiley & Sons Ltd, 1987, 93-133.
- [Baulac & Laborde 89] Baulac Y., Laborde J.-M., *CABRI-GEOMETRE : pour un nouvel apprentissage de la géométrie*, TSI, vol 8, 1989, 387-391.
- [Bruillard 91] Bruillard E., *Mathématiques et Enseignement intelligemment assisté par ordinateur*, Thèse de doctorat, Université du Maine, 1991.
- [Cauzinille-Marmèche & al 89] Cauzinille-Marmèche E., Joab M., Mathieu J. : *Naiade : a Knowledge Based System for explanation*, Proceedings of the International Conference on AI and Education, 42-46.
- [Delozanne E. & al 89] Delozanne E., Carrière E. : *Niveaux de connaissances dans un tuteur intelligent*, Actes des journées E.I.A.O, PRC IA, Cachan, 1989.
- [Guin 90] Guin D., *Modélisation des connaissances pour un système d'aide à la démonstration géométrique*, Actes du congrès APPLICA 90, 2<sup>nd</sup> Congrès Européen Intelligence Artificielle et Formation.
- [Guin 91-1] Guin D., *Nécessité d'une spécification didactique des environnements informatiques d'apprentissage*, Actes des 2<sup>èmes</sup> journées E.I.A.O de Cachan, ENS Cachan, 53-60.
- [Guin 91-2] Guin D., *Processus cognitifs d'acquisition des connaissances en mathématiques : modélisation intégrable à un environnement informatique*, document présenté en vue de l'habilitation, EHESS, à paraître comme publication interne du GDR Sciences Cognitives de Paris.
- [Guin & Groupe IA 91] Guin D., Groupe IA, *Modélisation de la démonstration géométrique dans Geometry Tutor*, Annales de Didactique et de Sciences Cognitives, vol 4, IREM de Strasbourg, 1991, 5-40.
- [Nicaud & al 89] Nicaud J.-F., Aubertin C., Nguyen Xuan A., Saïdi M., Wach P., *APLUSIX : un environnement d'apprentissage à plusieurs niveaux dans le domaine du raisonnement algébrique*, Actes des journées E.I.A.O du PRC IA (J.-F. Nicaud et M. Baron), Ens de Cachan, 1989, 297-315.
- [Pintado 91] Pintado M., *Apprentissage par analyse de solution - Application à la géométrie élémentaire*, Actes du colloque *KMET 91* (International Conference on Knowledge Modeling), Sophia Antipolis, 149-163.
- [Pitrat 90] Pitrat J., *Métaconnaissance*, Hermès, 1990.
- [Py 90] Py D., *Reconnaissance de plan pour l'aide à la démonstration dans un tuteur intelligent de la géométrie*, Thèse de doctorat, Université de Rennes, 1990.

- [Saïdi 90] Saïdi M., *Evaluation progressive de la connaissance et planification dans un environnement d'apprentissage de l'algèbre*, Actes des 2<sup>èmes</sup> journées E.I.A.O de Cachan, ENS Cachan, 91-103.
- [Vergnaud 90] Vergnaud G., *La théorie des champs conceptuels*, Revue en Didactique des Mathématiques, vol 10, n° 2/3, 1990, 133-170.
- [Vivet & al 88] Vivet M., Futersack M., Labat M., *Métaconnaissance dans les tuteurs intelligents*, International Conference Intelligent Tutoring Systems, Montréal, 1988.

# Une logique constructive pour l'apprentissage symbolique automatique

Melchior Ndarugendamwo  
LIUF-Université de Fribourg, Chemin du Musée 3,  
CH-1700 Fribourg (Suisse)  
Tél.: + 41 37 - 826 550, Fax : + 41 37 - 826 519,  
e-mail : Liuf@CFrUni52.bitnet

## Résumé

Nous avons relevé dans [5] et [6] que les logiques constructivistes, et spécialement la logique intuitionniste présentent un grand avantage sur les autres logiques lorsqu'il s'agit de capter la sémantique d'un modèle d'apprentissage. Nous présentons une extension de la logique intuitionniste, que nous appelons « *logique des justifications* ». Elle doit permettre de capter le caractère fondamentalement constructif du processus d'apprentissage. Elle comporte, outre les connecteurs usuels, un connecteur qui traduit une sorte de négation implicite ou d'indétermination: «  $\sim A$  » signifie « je ne sais pas que  $A$  et je ne sais pas que  $\neg A$  ».

### mots-clés :

apprentissage symbolique à partir d'exemples, généralisation, logique intuitionniste.

## 1 Motivation

Apprentissage et raisonnement sont deux mécanismes inséparables de la cognition. L'apprentissage par coeur ne suffit pas. Outre sa capacité de percevoir, un agent apprenant doit avoir la capacité de raisonner sur sa connaissance, sur ses réussites et sur ses échecs. A ce niveau, le mécanisme d'identification ou de classification ne suffit plus. La logique étant par définition dédiée à l'étude du raisonnement, la formalisation en logique nous paraît bien

adaptée pour rendre compte des étapes déductives du processus d'apprentissage.

Actuellement, on oppose souvent l'approche symbolique et l'approche connexionniste. Nous pensons que les deux approches ne s'excluent pas, mais qu'elles doivent au contraire se rapprocher et se compléter. Le connexionniste voudrait modéliser la cognition en tenant compte de l'ancrage biologique des mécanismes cognitifs. Si, à notre avis, le connexionnisme capte bien le niveau perceptif de la cognition, il est par contre difficile d'appréhender d'emblée les problèmes du méta-raisonnement en termes connexionnistes. L'approche « logique formelle » quant à elle ne se préoccupe pas du tout de l'ancrage biologique. En revanche, elle permet bien de capter le caractère réflexif (la « conscience ») du sujet apprenant.

Le processus d'apprentissage étant fondamentalement constructif et ouvert, une modélisation de l'apprentissage doit donc pouvoir rendre compte de ces deux propriétés, et doit permettre des explications de réussite ou d'échec, intelligibles à l'humain. La logique classique, par son principe de tiers exclu ne nous semble pas satisfaire les deux premiers critères. Nous proposons une logique, qui se trouve être un système ouvert, qui possède le caractère constructif, et que nous appelons « logique des justifications ».

## 2 Logique des justifications

Nous ne présentons ici que la partie propositionnelle de la logique des justifications  $J$ . Le langage  $L$  utilisé est celui de la logique intuitionniste, enrichi d'un connecteur spécial «  $\sim$  » (lire *indéterminé*). Nous distinguons deux types de littéraux: les  $J$ -littéraux, qui sont des formules de la forme  $A$ ,  $\neg A$  ou  $\sim A$ , où le symbole  $A$  représente une formule atomique; les  $I$ -littéraux, qui sont les  $J$ -littéraux ne contenant pas le connecteur «  $\sim$  ». Les deux ensembles sont notés respectivement  $JLitt$  et  $ILitt$ . Comme méta-langage, nous utilisons la logique classique.

Une  $J$ -interprétation est un quadruplet  $(W, w_0, \leq, F)$  tel que

- $W$  est un ensemble non vide,
- $\leq$  est un ordre partiel sur  $W$ , tel que  $(W, w_0)$  est un arbre,
- $w_0$  est la racine de l'arbre  $(W, w_0)$ ,
- $F$  est une application qui, à tout élément de  $W$  associe un ensemble de formules atomiques et telle que si  $w \leq \theta$  alors  $F(w) \subseteq F(\theta)$ .

Tout comme en logique intuitionniste, nous pouvons parler d'une relation « force », notée «  $\Vdash$  ». Elle est définie comme suit:

- Si  $A$  est un atome, alors  $[w \Vdash A \iff A \in F(w)]$ ;
- $w \Vdash \sim A \iff [w \not\Vdash A \text{ et } w \not\Vdash \neg A]$ .
- Dans les autres cas, elle se définit comme en logique intuitionniste.

A toute J-interprétation  $I = (W, w_0, \leq, F)$  est associée une application unique  $\sigma_I : W \rightarrow \mathcal{P}(ILitt)$  telle que:

$$X \in \sigma_I(w) \iff (I, w) \Vdash X$$

Nous définissons un ordre sur l'ensemble des J-interprétations. Pour deux J-interprétations  $I = (W, w_0, \leq, F)$  et  $I' = (W', w'_0, \leq, F')$ . Nous disons que  $I$  est *préférable* à  $I'$  si et seulement si  $\sigma_I(w_0) \subseteq \sigma_{I'}(w'_0)$ .

Afin de définir le concept de modèle d'un ensemble de formules, nous utilisons cet ordre sur les J-interprétations. Nous aimerions faire des inférences du type

$$p \vdash \sim q$$

qui ont pour sémantique « si je ne connais que  $p$ , alors  $q$  est indéterminé ». Si l'on prend par exemple la J-interprétation  $I = (\{\Gamma\}, \Gamma, \leq, F)$  avec  $F(\Gamma) = \{p, q\}$ ,  $I$  est une interprétation dans laquelle  $p$  est vrai, mais  $\sim q$  n'est pas vrai dans  $I$ . Il faut donc un outil pour capter la sorte de « minimalité de connaissance » qui est sous-entendue dans l'assertion  $p \vdash \sim q$ . On peut penser à l'opérateur « only knowing » de Levesque [4]. Les J-modèles traduisent cette notion de minimalité.

### 3 Propriétés de la logique J

Voici quelques observations à l'endroit de la logique des justifications.

1. La sémantique de  $J$  est comparable à celle des modèles bien fondés [7, 8], dans ce sens qu'elle confère à la disjonction un comportement « exclusif ». Soient  $a$  et  $b$  deux atomes. Les J-modèles de  $a \vee b$  sont toutes les J-interprétations telles que  $F(w_0) = \{a\}$  ou  $F(w_0) = \{b\}$ . Dès lors, les J-interprétations qui sont telles que  $F(w_0) \supseteq \{a, b\}$  ne sont pas des J-modèles de  $a \vee b$ .
2. Notre opérateur «  $\sim$  » est apparenté à l'opérateur  $M$  de la logique non monotone que proposent Clarke et Gabbay ([1], [2], [3]). Les définitions de ces opérateurs sont très proches l'une de l'autre:

- $w \Vdash MA \iff [\text{il existe } \theta \text{ tel que } (\theta \geq w \text{ et } \theta \Vdash A)].$
- $w \Vdash \sim A \iff [w \not\Vdash A \text{ et } w \not\Vdash \neg A].$   
ou encore
- $w \Vdash \sim A \iff [w \not\Vdash A \text{ et il existe } \theta \text{ tel que } (\theta \geq w \text{ et } \theta \Vdash A)].$

Ces deux opérateurs sont néanmoins très différents de par leurs implications sur le comportement des logiques qu'ils déterminent.

3. L'opérateur «  $\sim$  » a une sémantique très proche de celle de la négation par échec. Si, d'une base de connaissances, on ne peut déduire  $\alpha$ , alors, d'après la négation par échec, on infère  $not(\alpha)$ . Dans la logique  $J$ , si on

ne peut déduire  $\alpha$  et si on ne peut déduire  $\neg\alpha$ , alors on infère  $\sim\alpha$ . Ceci montre qu'il faut une représentation explicite de l'information négative. Ainsi la logique  $J$  sous-entend l'hypothèse du monde ouvert, alors que la négation par échec est basée sur l'hypothèse du monde clos. La logique  $J$  permet ainsi de capter le caractère ouvert de l'apprentissage.

4. La logique  $J$  est non monotone. En effet,  $T \vdash \sim\alpha$  entraîne  $T \cup \{\alpha\} \not\vdash \sim\alpha$ . Elle rend compte ainsi de l'aspect assimilation de la connaissance.
5. La logique  $J$  permet une sorte de rétrospective sur la connaissance. Dans l'apprentissage à partir d'exemples, si le système part d'une instance positive  $E_1 : a \wedge b$  et qu'on lui injecte l'instance positive  $E_2 : a \wedge c$ , la logique  $J$  permet de se « souvenir » que dans la présentation de  $E_1$ , on ne savait rien sur  $c$ . De même, dans  $E_2$  on ne sait rien sur  $b$ . Les deux instances s'écrivent alors:

$$E_1 : a \wedge b \wedge \sim c$$

$$E_2 : a \wedge \sim b \wedge c.$$

Ceci permet de garder le « souvenir » des descripteurs déjà rencontrés, et de ce fait, de construire plus facilement des descriptions plus précises du concept à apprendre.

## 4 Conclusion

Nous avons présenté une logique qui capte deux des caractères fondamentaux du processus de l'apprentissage : elle est constructive et c'est un système formel ouvert. Elle s'abstient en outre de faire des hypothèses trop précises et idéalistes sur le raisonnement.

Nous pensons que cette logique constitue un cadre intéressant pour la modélisation de processus d'apprentissage, qui serait à même de supporter des mécanismes réflexifs (traduisant la propriété de « conscience ») dont doit rendre compte un système d'apprentissage automatique qui vise à modéliser des mécanismes cognitifs (et non pas simplement être « opérationnellement » satisfaisant dans certains domaines spécifiques). Ainsi, sans prétendre caractériser exhaustivement le processus d'apprentissage en termes logiques, notre espoir est qu'une telle formalisation pourrait néanmoins permettre d'en éclaircir certains aspects.

En ce sens notre démarche n'est pas un point final, mais plutôt, par exemple, un travail préliminaire au prolongement des modèles connexionnistes et à leur confrontation aux acquis des modèles symboliques, en particulier logiques.

## Références

- [1] CLARKE (Michael R. B.). – Intuitionistic Non Monotonic Reasoning—further results. *In: Proceedings of the 8th European Conference on Artificial Intelligence*, éd. par Kodratoff (Yves). European Coordinating Committee for Artificial Intelligence, pp. 525–527. – Munich, August 1–5 1988.
- [2] CLARKE (Michael R. B.) et GABBAY (D. M.). – An Intuitionistic Basis for Non-Monotonic Reasoning. *In: Non-Standard Logics for Automated Reasoning*, éd. par Smets (P.), Mamdani (A.), Dubois (D.) et Prade (H.), chap. 6, pp. 163–178. – London, Academic Press, 1988.
- [3] GABBAY (Dov M.). – Intuitionistic Basis for Non-Monotonic Logic. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 138, 1982, pp. 260–273. – Elsevier Science Publishing Co., Inc.
- [4] LEVESQUE (Hector J.). – All I Know: A Study in Autoepistemic Logic. *Artificial Intelligence*, vol. 142, n° 2–3, March 1990, pp. 263–309. – North-Holland.
- [5] NDARUGENDAMWO (Melchior) et COURANT (Michèle). – *Réflexions sur une négation pour l'apprentissage*. – Publication interne n° 16, Fribourg (Suisse), Laboratoire d'Informatique, Université de Fribourg, avril 1991.
- [6] NDARUGENDAMWO (Melchior) et COURANT (Michèle). – *Négation et programmation en logique*. – Publication interne n° 17, Fribourg (Suisse), Laboratoire d'Informatique, Université de Fribourg, avril 1991.
- [7] PRZYMUSINSKI (T. C.). – Every Logic Program has a Natural Stratification and an Iterated Fixed Point Model. *In: Proceedings of the 8th ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems*, éd. par Association of Computing Machinery (ACM), pp. 11–21.
- [8] VAN GELDER (A.), ROSS (K.) et SCHLIPF (J. S.). – Unfounded Sets and Well-founded Semantics for General Logic Programs. *In: Proceedings of the 7th ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems*, éd. par Association of Computing Machinery (ACM), pp. 221–230.

# **Soirée Vygostky**

# Des complexes aux concepts, .... programmer Vygotsky ?

*Françoise Forest  
LIMSII/CNRS  
91403, Orsay, FRANCE*

## **pour situer le propos**

Travailler dans le domaine de la compréhension automatique du langage naturel peut paraître une gageure aux yeux des psycholinguistes. Le point central du domaine consiste à savoir s'il est possible de parler "du", et donc de représenter "le" sens d'un énoncé ou d'un texte. Je crois qu'une meilleure approche consiste à parler plutôt du *sens d'un message, en situation de communication*. On voit ainsi plus clairement apparaître le rôle central que jouent les interlocuteurs et l'on est moins tenté de penser qu'il faut attacher "ce" sens au seul message. Mon propos est de dire que le sens d'un énoncé n'existe pas en dehors de la situation de communication, et notamment sans une connaissance de l'expérience de l'individu récepteur du message. La compréhension d'un énoncé est le résultat des interactions sociales passées de l'individu avec le monde et de ses interactions présentes, notamment avec son interlocuteur. Cette proposition a pour objectif de présenter le résultat des réflexions que m'a inspirées jusqu'à présent la lecture des travaux de Vygotsky, psycholinguiste russe du début du siècle, assez méconnu à ma connaissance, en particulier parmi les informaticiens. Je me suis intéressée à l'aspect opérationnel de sa conception de l'ontogénèse du langage.

*Son approche de la construction et de l'évolution des concepts à partir de l'expérience peut-elle se traduire du point de vue informatique ? C'est à cette question que je tente d'apporter des éléments de réponse.*

## **introduction**

Lorsqu'on lit les travaux de Vygotsky sur la construction des concepts quotidiens chez l'enfant, on est frappé par l'aspect quasi opérationnel des étapes qu'il décrit. Les premières étapes se ramènent à une accumulation d'observations qui aboutissent à la construction de ce qu'il nomme des *complexes*. On peut les modéliser assez simplement, semble-t-il, en utilisant des outils statistiques. L'étape de formation des concepts adultes, quant à elle, est très intrigante du point de vue de l'informaticien. Comment modéliser ce saut qualitatif qui permet de passer d'une simple accumulation d'expériences à une généralisation, c'est-à-dire une prise de conscience des caractéristiques communes à un certain nombre d'observations particulières qui permet à l'enfant la construction d'un code unique pour les représenter ? Et qu'est-ce qui fait que ce sont certaines caractéristiques et non d'autres qui servent d'appui à la construction de cette généralisation ?

La construction des complexes, au sens de Vygotsky, sera seule présentée dans cet exposé, le passage aux concepts proprement dits, puis le processus d'évolution qu'ils subissent restant encore du domaine des interrogations.

En nous appuyant sur des techniques d'analyse des données utilisées dans un contexte connexionniste, nous étudions comment, à partir d'une très grande quantité de données supposées refléter la vision verbale qu'un certain individu possède du monde qui l'entoure, il est (peut-être) possible d'explicitier des processus d'émergence de concepts<sup>1</sup>.

## les données

Nous nous situons dans le domaine de l'informatique linguistique : le modèle que nous proposons associe les événements observés par un individu donné aux mots avec lesquels cet individu peut les décrire. Il s'exprime en termes de graphes valués, de propagation d'activation le long des arcs et de condensation de graphes.

Notre travail s'appuie sur deux hypothèses :

- d'une part, les mots (qui sont les instruments de la communication des significations d'un individu à l'autre) sont des entités dont l'existence est extérieure aux individus acteurs de la communication,

- d'autre part, les événements décrits par les mots sont des événements du monde réel, dont l'existence est elle aussi extérieure aux individus qui les perçoivent.

Traduire l'expérience d'un individu revient alors, pour chacun des événements observés par cet individu, à mémoriser cet événement et à lui associer l'image verbale que l'individu s'en est fait.

Les deux hypothèses précédentes nous permettent de construire une structure qui ancre les significations dans le réel. En effet, pour un individu donné, les associations entre mots et événements seront spécifiques, mais d'un individu à l'autre (pourvu qu'ils aient une certaine communauté d'expériences et de langue), on pourra effectuer des comparaisons sur ces associations, et par conséquent sur les significations que chacun de ces individus s'est construites.

## la structure informatique proposée

Chacun des événements observés contribue à la construction d'un graphe bipartite, dont les noeuds sont soit des mots, soit des événements, et que nous appelons "*contexte intellectuel*". Un lien s'établit entre un mot et un événement si le mot participe à la perception verbale que l'individu considéré a de cet événement. Des liens de chronologie sont également construits pour relier les mots d'un même énoncé<sup>2</sup>.

Pour exprimer le fait que chacun des événements observés n'a pas la même prégnance dans le souvenir de l'individu, et que la force de liaison n'est pas obligatoirement identique entre le

---

<sup>1</sup>Vygotsky détaille les différentes étapes de la construction des concepts chez l'enfant en mettant en évidence la différence de nature de cette acquisition pour les concepts quotidiens et pour les concepts scientifiques, les uns émergeant de l'expérience, les autres existant d'abord dans leur relation avec d'autres concepts (sous forme d'une définition verbale) avant de prendre ancrage dans cette expérience [Vygotsky 85]. Dans la suite, on parlera des *concepts* alors qu'il serait plus exact de parler des *complexes* qui constituent les étapes intermédiaires avant la construction des *concepts adultes*.

<sup>2</sup>Ces liens ne sont pas exploités dans le modèle actuel mais ils permettent de mémoriser la succession des mots dans les énoncés, succession qui nous semble à la base de l'acquisition de la syntaxe.

souvenir d'un événement et chacun des mots (plus généralement chacune des perceptions) qui ont servi à le mémoriser<sup>3</sup>, nous introduisons des données quantitatives qui sont le *coefficient de réceptivité* d'un événement et le *coefficient d'influence* d'un mot dans un énoncé.

Nous appelons "*graphe de premier niveau*" le graphe partiel construit à partir du contexte intellectuel en ne conservant que les arcs qui associent un mot à un événement. Aux arcs et aux sommets de ce graphe, nous associons des poids calculés à partir des coefficients introduits plus haut (et explicités au paragraphe suivant).

Nous appelons "*graphe de deuxième niveau*" le graphe obtenu en supprimant les noeuds-événements et en liant les noeuds-mots par des arcs orientés dont le poids est fonction des poids des chemins existant entre les mots dans le graphe de premier niveau.

Le troisième niveau, que nous appelons "*réseau sémantique*", constitue quant à lui le niveau des concepts stables. Il est lié au graphe de deuxième niveau par un ensemble de connexions qui lient chacun des mots à chacun des concepts. Ces connexions sont affectées d'un poids qui exprime la force de la liaison "sémantique" entre le mot et le concept.

*Nous allons examiner quels outils sont utilisables pour aboutir à la détection des concepts stables, et comment formuler le problème en vue d'une résolution avec chacun de ces outils.*

## les outils sollicités

### *Quantification sur les liens et les noeuds du graphe de premier niveau*

- *le poids des événements* : c'est le rapport de son coefficient de réceptivité sur la somme des coefficients de réceptivité de tous les événements du contexte intellectuel. La somme des poids des événements vaut 1.

- *le poids d'un arc reliant un événement à un mot* est le rapport du coefficient d'influence du mot dans la description de l'événement sur la somme des coefficients d'influence de tous les mots intervenant dans la description de cet événement. La somme des poids des arcs ayant pour origine un événement donné vaut 1.

- *le poids d'un mot* est la somme des poids des arcs issus de ce mot pondérés par le poids de l'événement extrémité de chaque arc. La somme des poids des mots vaut 1.

- *le poids d'un arc reliant un mot à un événement* est le rapport du poids de l'arc inverse pondéré par le poids de l'événement (*participation de l'événement* au poids du mot) sur la somme des participations des événements reliés à ce mot. La somme des poids de tous les arcs issus d'un mot vaut 1.

Comme on le voit le poids d'un arc n'est pas égal au poids de l'arc inverse. Ce phénomène modélise le fait que, si un mot fait penser à un certain événement, il n'y a aucune raison pour que l'événement fasse inversement penser à ce mot. C'est notamment ce qui se passe dans l'association d'idées.

### *Outils de l'analyse des données*

Les méthodes classiques d'analyse des données font appel à la notion de similarité ou de dissimilarité entre des individus. Les poids des arcs dans le graphe de deuxième niveau (qu'on peut interpréter comme l'attraction exercée par un mot sur un autre) ou dans le graphe de premier niveau (qu'on peut interpréter comme les degrés de participation de chaque mot aux différents événements et de chaque événement aux différents mots) peuvent-ils servir à la définition d'un indice de liaison entre mots qui, bien que n'étant pas symétrique, pourrait jouer ce rôle ?

---

<sup>3</sup>[Grunig & Grunig 85] parlent des *pressions externes et internes* subies par l'individu.

La formulation du problème en termes d'analyse de données nécessite de se placer dans le graphe de deuxième niveau : Il nous faudra choisir entre définir un indice de similarité entre mots qui soit symétrique et qui permette d'utiliser sans modifications ces méthodes, ou conserver la notion de force de liaison entre mots, non symétriques, qui nécessite leur adaptation.

Les nuées dynamiques et l'analyse en composantes principales se prêtent bien à une formulation en termes de graphes, elles sont étudiées plus précisément par ailleurs [Forest 91].

### *Outils connexionnistes*

Une autre classe de techniques permettant ce repérage des concepts est celle qui consiste à considérer le graphe de premier ou de deuxième niveau comme un réseau de neurones.

- On peut ainsi considérer chaque noeud-mot du graphe de premier niveau comme un neurone de la couche d'entrée et chaque noeud-événement comme un neurone de la couche de sortie d'un perceptron à une couche cachée dont les neurones seront interprétés comme les "concepts" associés (plus ou moins fortement) à chacun des mots du contexte intellectuel. [Gallinari & al. 91] ont montré que le résultat d'un apprentissage par rétro-propagation dans ce type de réseau se ramène à interpréter les neurones de la couche cachée comme les premiers axes factoriels d'une analyse discriminante sur l'ensemble des mots muni d'une distance.

- On peut considérer le graphe de premier niveau, ou celui de deuxième niveau comme un réseau de Hopfield. L'absence de symétrie des connexions entre neurones pose alors le problème de la stabilisation du réseau.

Un travail de reformulation de ces différents modèles de réseaux est nécessaire pour pouvoir mieux cerner les méthodes applicables à notre problème.

Une première étude semble montrer deux points de divergence importants entre les techniques traditionnelles d'analyse des données et les modèles connexionnistes classiques d'une part et notre problématique d'autre part :

- dans nos graphes, les arcs sont orientés et leur poids diffère selon leur sens de parcours, ce qui remet en cause la notion de distance qui fonde les méthodes d'analyse des données et la notion de lien symétrique des modèles de Hopfield,

- la méthode d'apprentissage est en grande partie "cachée" dans les données sous la forme des coefficients d'influence et de réceptivité.

D'autres outils, comme les ensembles flous ou les systèmes dynamiques, sont également disponibles, mais évoquer la grande variété des solutions techniques a ici pour objectif principal de mettre en évidence que le point délicat ne se situe pas à ce niveau, mais au niveau des données elles-mêmes : notre but est de faire émerger "les" concepts à partir de données numérico-linguistiques. Le choix de quantification des liens dans le graphe de premier niveau et la technique d'émergence associée jouent un rôle primordial dans le résultat, c'est-à-dire dans le choix des nuages de mots qui présenteront la plus grande cohésion interne et la plus faible liaison externe. Notre préoccupation est que ces associations de mots soient linguistiquement valides et (éventuellement) psychologiquement justifiées.

## **une proposition de travail interdisciplinaire**

Le passage des complexes aux concepts adultes fait intervenir d'autres phénomènes que l'accumulation d'expérience. Il suppose notamment que certains seuils de conceptualisation ont

été franchis [Vygotsky 85] [Karmiloff-Smith 91]. Par ailleurs, ces concepts ne sont ni définitivement stables pour un individu, ni identiques d'un individu à l'autre...

Si l'informaticien ne peut proposer seul des réponses à tous ces aspects du problème, il peut par contre proposer aux psycholinguistes un outil avec lequel ceux-ci pourraient tester quelques hypothèses<sup>4</sup>, notre ambition n'étant pas de fournir un système de construction de réseau sémantique "clés en main" mais de mettre au point un outil suffisamment paramétré pour servir à l'observation des conséquences de l'application de certaines hypothèses psychologiques ou linguistiques sur l'émergence de concepts stables, lorsqu'on considère que l'existence de ces concepts est en relation d'une façon ou d'une autre avec la densité de l'ensemble de perception de l'expérience d'un individu.

Notre ambition est également de proposer un outil qui permette ces tests sur des quantités significatives de données. Il ne semble pas envisageable de construire un réseau sémantique fondé sur l'expérience acquise par un individu tant qu'on laissera entendre qu'il sera implanté sur une machine séquentielle classique. C'est pourquoi nous nous sommes intéressée aux possibilités, tant en capacité qu'en rapidité, d'une machine massivement parallèle rendant envisageable des tests sur des millions d'énoncés [Forest 92].

## Bibliographie

CELEUX G. & al., *Classification automatique des données*, Dunod informatique, 1989

DAVALO E. & NAÏM P., *Des réseaux de neurones*, Eyrolles, Paris, 1990

[Forest 90] FOREST F., *Le sens d'un énoncé est fondamentalement lié à l'expérience de l'individu qui le perçoit*, 4ème colloque de l'ARC, Paris, 28-30 Mars 1990

[Forest 91] FOREST F., *le traitement massivement parallèle de données textuelles*, proposition de rapport interne LIMSI, Novembre 1991

[Forest 92] FOREST F., *Se donner les moyens d'une approche constructiviste de la représentation du sens*, soumis à ARC92, Octobre 1991

[Gallinari & al. 91] GALLINARI P. & al., *On the relations between discriminant analysis and multilayer perceptrons*, *Neural networks*, vol.4, pp.349-360, 1991

[Grunig & Grunig 85] GRUNIG B.N. & GRUNIG R., *La fuite du sens dans l'interlocution*, Hatier-Credif, Paris, 1985

[Karmiloff-Smith 91] KARMILOFF-SMITH A., *Thought processes : grouping and redescription*, Workshop on hybrid models for and of cognition, the Royal Society, Londres, 2-3 Septembre 1991

[Vygotsky 85] VYGOTSKY L.S., *Pensée et langage*, Editions sociales, Paris, 1985

---

<sup>4</sup>Karmiloff-Smith a étudié les relations entre le comportement de certains types de réseaux connexionnistes et les étapes de développement chez l'enfant.

Siksou Maryse  
Université Paris 7  
29 rue Alphonse Bertillon  
75015 Paris

**Journées de Rochebrune "**  
*20-24 Janvier 1991*

**Système fonctionnel et apprentissage du Langage écrit**

Vygostky pour échapper aux conceptions de la "localisation de fonctions" ou à celle de "l'équipotentialité " propose , en 1934 , une "*nouvelle théorie historique* des fonctions supérieures "Il s'appuie sur trois postulats:

- les relations entre fonctions sont plastiques
- les systèmes dynamiques complexes doivent être considérés comme l'intégration de fonctions élémentaires
- le réel se réfléchit de façon catégoriel dans l'esprit humain .

Les systèmes fonctionnels sont *sociaux* par leur origine , *systémiques* dans leur structure et *dynamiques* dans leur développement , ils conduisent à repenser la notion de fonctions et de structures Aucune fonction spécifique n'est jamais fondée sur l'activité d'une zone limitée,des syndromes identiques peuvent survenir après des lésions localisées différemment et inversement,les connexions "extra-cérébrales " jouent un rôle important .Pour Vygostky ce n'est que progressivement que les "fonctions " s'intériorisent et se dégagent des activités externes .

Cette conception est reprise par Luria (la conception de "cycles de phase " chez Hebb en est proche)L'apprentissage de l'écriture permet d'en fournir une illustration "*Le langage écrit constitue dès le début une activité volontaire comportant une analyse consciente de ses éléments* "(in A Luria *Les fonctions corticales supérieures de l'homme* p475 )

Au début du processus d'acquisition l'écriture dépend de l'analyse : du complexe acoustique du mot,de la forme visuelle des lettres individuelles de la mémorisation des formes graphiques de chaque lettre, les chaînes d'impulsions motrices rendent chacune possible la réalisation d'un élément graphique .Avec la pratique , et l'automatisation , la structure du processus change et donne lieu à une seule "*mélodie cinétique* " qui n'exige ni la mémorisation des formes individuelles de chaque lettre , ni celle des chaînes isolées d'impulsions nerveuses

.La complexité de ce système fonctionnel permet de comprendre :  
l'hétérogénéité de la pathologie, les modifications de cette  
activité au cours du développement , et la différence de structure  
de l'écriture selon les systèmes linguistiques

.Le système d'analyse proposé par ces auteurs conduit à modifier la  
méthodologie de recherche en analysant des *unités* ,et non des  
éléments ,et en isolant des *systèmes* ,et non des fonctions .

Dans la lignée de Vygostky on peut trouver dans les travaux plus  
récents de B.Schnewly portant sur la construction du langage  
écrit un autre type de filiation insistant sur la fusion entre  
*représentation* et *communication*.

Une réflexion reste à poursuivre sur l'actualité de ces travaux.

|

	Prénom	Organisme	Adresse	Ville	ZIP	Pays	Tel	Fax
	Dominique	Dpt. de Maths, Univ. Montpellier II	Place Eugène Bataillon	Montpellier Cedex	34095		67 14 35 15	67 54 30 79
	Jean-Marc	Univ. C. Bernard Lyon 1 et INSA	Batiment 710, 43 Bd du 11 Novembre 1	Villeurbanne Cede	69622		72 44 83 69	72 44 83 64
	Marc	EDF-DER-ER-MOS gp AISE	1 av. du Général de Gaulle	Clamart Cedex	92141			
	Jean-Louis	Telecom Paris, Dpt. Informatique	46 rue Barrault	Paris	75013			
	Eric	Telecom Paris, casier 59	46 rue Barrault	Paris	75013			
	Alain	Telecom Paris, Département Informatique	46 rue Barrault	Paris	75013			
	Claude	L.E.R.I.	Parc Georges Besse	Nîmes	30000		66 38 70 29	<del>66 76 24 60</del>
	Olivier	L.E.R.I.	Parc Georges Besse	Nîmes	30000		66 38 70 29	66 76 24 60
	Philippe	Univ. de Nice-Sohia Antipolis, CNRS - I3S	Bat. 4, rue A. Einstein	Valbonne	O6560		92 94 26 17	92 94 28 98
	E.	L.E.A.C.M., Institut de psychologie	5 av. Pierre Mendès-France	Bron Cedex	C.P. 11		78 00 63 33	
	C.	L.E.A.C.M., Inst. de psychologie	5 av. Pierre Mendès-France	Bron Cedex	C.P. 11			
	N.	L.E.A.C.M., Inst. de psychologie	5 av. Pierre Mendès-France	Bron Cedex	C.P. 11			
	Melchior	LIUF-Univ. de Fribourg	Chemin du Musée 3	Fribourg	CH-1700 Suisse			
	F	UFR de Psychologie, Univ. René Descartes	28 rue Serpente	Paris	75006			
	Joëlle	Uni. de Nice-S Antipolis,CNRS-I3S	Bat. 4, rue A. Einstein	Valbonne	O6560		92 94 26 17	92 94 28 98
	Alexandre	LIMSI-CNRS	BP 133	Orsay Cedex	91403		69 85 80 80	69 85 80 88
	Christophe	velyne						
	Herminia	UNED, Facultad de Psicologia	Apartado n°50.487	Madrid		Espagne		
	Brigitte	LIMSI-CNRS	BP 133	Orsay Cedex	91403		69 85 80 80	69 85 80 88
	Mariarosa	GNOSIS	2 rue des sablons	Chatou	78400			
	C.	INRS	BP 27	Vandoeuvre	54501		83 50 20 00	
	M.	INRS	BP 27	Vandoeuvre	54501			
	Martine		20 rue de Rambervilliers	Paris	75012			
	Martine		154 rue Principale	Liège-Rocourt	4420	Belgique		
	Danièle	CNRS, Laboratoire de Psychologie du Tra	41 rue Gay-Lussac	Paris	75005			
	Evelyne	INSERM						
	Richard		2 av. Port-Royal des champs	Le Mesnil St Den	78310			
	John		7 rue Vulpin	Paris	75013			
	Pierre-Yves		4 rue du roi de Sicile	Paris	75004			
	Vincent	CEMAGREF, Laboratoire d'Intelligence A	Parc de Tourvoie	Antony	92185			
	Paul	CEMAGREF	Parc de Tourvoie	Antony	92185			
	Sylvie	Université Paris V,EHEI	Rue des Saints Pères	Paris	75007			
	Schéhérazac	A.F.P.A.	63 rue Ampère, ZI Les Chanoux,BP 15	Neuilly-sur-Marn	93330		43 00 96 40	43 00 10 06
	Litumba	Ecole Centrale de Lille, Laboratoire d'Amé	17/11 rue Turgot	Wattrelos	59150			
	Maryse	Université Paris 7	29 rue Alphonse Bertillon	Paris	75015			
	Françoise	LIMSI-CNRS	BP 133	Orsay Cedex	91403		69 85 80 80	69 85 80 88
	Bernadette	Université Paris 6, LAFORIA	4 place Jussieu	Paris	75005		44 27 70 03	
	Henri	Université Lyon 2, MSH	14 Av Berthelot	Lyon Cedex 07	69363		72 72 64 02	72 72 64 72
	Jean-Pierre	Université Lyon 2, MSH	14 Av Berthelot	Lyon Cedex 07	69363		72 72 64 02	72 72 64 72
	Denis	Groupe ESC Lyon	23 Av. Guy de Collongue, BP 174	Ecully Cedex	69132		72 20 25 25	78 33 61 69
	Benoit							

*Aune*